

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**Departamento de Petrología y Geoquímica**



**PROCESOS Y FORMAS DE DETERIORO TÉRMICO EN PIEDRA  
NATURAL DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

**PRESENTADA POR**

Miguel Gómez Heras

Bajo la dirección del doctor

Rafael Fort González

**Madrid, 2005**

**ISBN: 84-669-2801-4**

# **Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico**

# **Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico**

Miguel Gómez Heras



Memoria presentada para optar al grado de Doctor Europeo de la  
Universidad Complutense de Madrid

Tesis doctoral dirigida por el Doctor Rafael Fort González, científico titular  
del Instituto de Geología Económica del Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas y la Universidad Complutense de Madrid.

Vº Bº

Fdo: Dr Rafael Fort González

Madrid, Abril de 2005

*Grandes son las obras del Señor,  
dignas de estudio para los que las aman*

(Salmo 110)



---

Mi gratitud es tan inmensa hacia tantas y tantas personas que han contribuido a alcanzar este sueño, que casi me avergüenza intentar reducirla a estas breves líneas, cuando su apoyo ha significado tanto para mí.

Primero quiero dar gracias a Dios, más allá de la vacuidad que ha alcanzado esta frase hecha. A Él le debo mucho, entre otras, el que pueda defender esta tesis de pie.

A mi director el Doctor Rafael Fort González. Sin él nada de esto hubiera sido posible. Su confianza en mi tarea, su consejo y su apoyo personal han significado todo para mí durante estos años.

A mi tutor el Doctor Francisco Mingarro Martín. Su cordialidad y preocupación me ha hecho sentirle siempre como a un “abuelo científico” cuidando de su nieto.

A mis padres, que me dieron la existencia, una educación y la inquietud por la investigación, pero sobre todo, toneladas de cariño y apoyo en los momentos más difíciles, aun a pesar de mi habitual distancia. Al resto de mi familia, especialmente a mi hermana por su inmensa admiración, interés y afecto, y a mi hermano por su presencia tranquila y las perlas de sabiduría sobre la vida que siempre me ha brindado, pero también a los demás que siempre se han preocupado por mí y mi tarea.

A los que, fuera de mi familia, durante toda mi vida avivaron mi gusto por la ciencia y providentemente me condujeron a donde estoy ahora. Especialmente quiero agradecer a Manane y José Ángel.

A mis amigos, que han soportado pacientemente las fluctuaciones, no térmicas, pero de estados de ánimo de este periodo y que siempre han demostrado una fe fuera de lo común en mi trabajo. Also I thank to those other good friends that I met abroad and demonstrated that the support of the friendship doesn't know about borders or distances.

A mis compañeros más cercanos que me han aguantado a diario, Mónica, Conchita, M<sup>a</sup> José, Elena, César y M<sup>a</sup> Carmen. Sin ellos tampoco hubiera podido conseguirlo. También al Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM) y concretamente al departamento de Petrología y Geoquímica de la Universidad Complutense que me acogieron para desarrollar mi labor durante estos años.

I wish also to thank to the Queen's University of Belfast where the present thesis was partially carried out; I wish to kindly thank to all the staff and research students for their outstanding help, but most especially to the Professor Bernard J. Smith, who patiently encouraged me and brought me his overwhelming experience in this field of research.

Quiero agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia las diferentes becas para el desarrollo de la tesis y las estancias, y al CSIC al que estaban adscritas; especialmente al departamento de Postgrado por atenderme siempre con una cordialidad intachable.

A todas las empresas, organismos o individuos que han colaborado suministrando material, ayuda técnica o facilitándome acceso a instalaciones: Al Doctor Arquitecto V. Berriochoa, J.J. Zapater y O. Lázaro; a Mármoles Antonio García Fernández, S.A., Pavestone (grupo DFG), Ramilo S.A., Bateig-Piedra Natural, S.A.; al Patrimonio Nacional, Servicio de Patrimonio y personal de seguridad del CSIC y OTRI del CSIC; al Centro Láser UPM, Laboratorio de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante, Laboratorio de Geoquímica del Museo Nacional de Ciencias Naturales y los CAI de la UCM (microscopía, FT-IR, DRX, TG).

Y a tantos que, aunque no haya nombrado aquí, les estaré toda la vida agradecido.

## Índice

<b>Resumen / Abstract.</b>	15
<b>1. Study of thermal decay processes and patterns in natural stone from the architectural heritage.</b>	17
<b>1.1. Introduction.</b>	17
<b>1.2. General aims and specific objectives.</b>	19
<b>1.3. Methodology.</b>	20
THERMAL DECAY OF STONE AT ENVIRONMENTAL TEMPERATURES	
<b>1.4. Design of Automatic cabinet for monitoring thermal behaviour of building materials.</b>	22
<b>1.5. Depth temperature profiles under convection and radiation regimes.</b>	22
<b>1.6. Surface temperature differences between mineral grains.</b>	25
<b>1.7. Influence of heating regimes in salt decay patterns.</b>	27
<b>1.8. Influence of the thermal microenvironment in the decay of buildings.</b>	28
<b>1.8.1. Thermal microenvironment and decay of microgranular enclaves</b>	29
<b>1.8.2. Artificial lithological variations and temperature</b>	30
THERMAL DECAY AT HIGH TEMPERATURES	
<b>1.9. Fire decay simulation by means of laser techniques.</b>	32
<b>1.10. Effects of fire on historic buildings.</b>	34
<b>1.10.1. Friable stones.</b>	34
<b>1.10.2. Tough stones.</b>	36
<b>1.11. Shock and fatigue in thermal decay.</b>	38
<b>1.12. Conclusions.</b>	39
<b>2. Objetivos.</b>	45
<b>3. Antecedentes históricos.</b>	49
<b>3.1. La piedra natural y su deterioro.</b>	49
<b>3.2. La hipótesis de la meteorización por insolación.</b>	55
<b>3.3. El deterioro causado por el fuego.</b>	60
<b>4. Metodología.</b>	63

## DETERIORO TÉRMICO DE MATERIALES PÉTREOS EN EL RANGO AMBIENTAL DE TEMPERATURAS

<b>5. Diseño experimental de cámara para el estudio de los materiales en entornos de radiación.</b>	69
<b>5.1. Antecedentes: Diseños anteriores.</b>	71
<b>5.2. Descripción del prototipo.</b>	73
<b>5.2.1. Descripción de los elementos físicos de la cámara.</b>	74
<b>5.2.2. Descripción de los elementos eléctricos de la cámara.</b>	78
<b>5.3. Control del instrumento y programación.</b>	85
<b>5.4. Puesta a cero y calibrado del instrumento.</b>	86
<b>6. Perfiles de distribución longitudinal de temperaturas en regímenes de radiación y convección: implicaciones para la generación de formas planares de deterioro.</b>	93
<b>6.1. Materiales y métodos.</b>	96
<b>6.2. Caracterización de los materiales.</b>	103
<b>6.3. Evolución y perfiles de distribución de temperaturas en regímenes de convección y radiación.</b>	107
<b>6.4. Ensayos de envejecimiento térmico acelerado en régimen de radiación.</b>	129
<b>7. Distribución superficial de temperaturas en regímenes de radiación: implicaciones para la generación de disgregación granular.</b>	131
<b>7.1. Materiales y métodos.</b>	134
<b>7.2. Caracterización de los materiales.</b>	137
<b>7.3. Evolución de la temperatura superficial de los materiales.</b>	139
<b>8. Implicaciones del régimen de calentamiento en el ensayo de deterioro por sales.</b>	151
<b>8.1. Materiales y métodos.</b>	153
<b>8.2. Caracterización del material.</b>	156
<b>8.3. Ensayo de envejecimiento por sales en convección y radiación.</b>	158
<b>9. Influencia del microambiente térmico en el deterioro de edificios</b>	169
<b>9.1. Deterioro de enclaves microgranulares y microambiente térmico:</b>	
<b>Pabellón Central del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.</b>	172
<b>9.1.1. Descripción de los enclaves microgranulares y su deterioro.</b>	179

9.1.2. Evolución térmica diaria de enclaves y encajante.	188
9.1.3. Distribución térmica espacial de enclaves y encajante.	199
9.2. Variabilidad litológica y temperatura; incompatibilidad térmica:	
El Panteón de Hombres Ilustres de Madrid.	203
9.2.1. Diferencias litológicas y temperatura.	208
9.2.2. Regímenes de temperaturas y heladicidad.	213
9.2.3. Evolución térmica y deterioro de tratamientos de protección.	215
9.2.4. Evolución espacial de las temperaturas.	218

## DETERIORO TÉRMICO DE MATERIALES PÉTREOS A ALTAS TEMPERATURAS

10. Simulación mediante técnicas láser del quemado de materiales pétreos en incendios.	223
10.1. Técnicas experimentales existentes para el ensayo del deterioro por fuego de materiales pétreos.	224
10.2. Consideraciones metodológicas para la elección de una nueva técnica de ensayo.	226
10.2.1. Material de partida y cantidad de muestra.	226
10.2.2. Precisión en la reproducción de la física del proceso real de quemado.	229
10.3. El láser como técnica para la simulación del fuego en materiales pétreos.	230
10.4. Descripción de los materiales y diseño del experimento.	233
10.5. Ensayos para la optimización de las condiciones de aplicación del láser.	237
10.6. Evolución de los materiales con la temperatura.	244
11. Efectos del fuego en materiales pétreos de edificios históricos.	257
11.1. Efectos del fuego en materiales pétreos friables.	258
11.1.1. Efectos del fuego en areniscas con matriz calcárea (Piedra de Uncastillo).	263
11.1.2. Efectos del fuego en areniscas con matriz silíceas (Arenisca de Villamayor).	272
11.2. Efectos del fuego en materiales pétreos competentes.	284
11.2.1. Efectos del fuego en dolomías cristalinas (Dolomía de Redueña).	287

<b>11.2.2.</b> Efectos del fuego en rocas graníticas (Granito de Guadarrama).	293
<b>11.3.</b> Influencia de la litología en el deterioro de los materiales pétreos a altas temperaturas	308
<b>12.</b> Relaciones entre el deterioro térmico a temperaturas ambientales y altas y los mecanismos de <i>choque térmico</i> y <i>fatiga</i> .	311
<b>13.</b> Conclusiones	315
<b>Referencias</b>	323

---

## RESUMEN

El deterioro térmico de los materiales pétreos de construcción es una realidad compleja que incluye dos mecanismos fundamentales: La llamada *meteorización por insolación*, asociada con ciclos ambientales de cambio de temperatura, y el deterioro causado por los fuegos. La discusión sobre estos mecanismos se remonta al siglo XIX. Sin embargo, hasta la fecha se ha mantenido una relativa falta de conocimiento del alcance real de los procesos de deterioro térmico. Esta tesis explora diversos temas relacionados con los procesos de deterioro térmico y sus efectos en la piedra de cantería. La investigación ha incluido el análisis en el laboratorio de la respuesta térmica de la piedra a diferentes rangos de variación de temperatura, así como la influencia que los regímenes de calentamiento pueden tener en el ensayo de laboratorio de otros agentes de deterioro como la cristalización de sales. Esto se complementa con el desarrollo de soluciones tecnológicas para el ensayo de laboratorio del deterioro térmico y el estudio de una serie de casos prácticos de edificios afectados por procesos de deterioro térmico.

## ABSTRACT

The thermal decay of building stones is a complex reality that includes two fundamental mechanisms: So-called ‘insolation weathering’, associated with environmental cycles of heating and cooling, and the decay generated by fires. The discussion on these mechanisms goes back to the 19<sup>th</sup> century. Nevertheless, a relative lack of knowledge on the real extent of thermal decay processes has persisted to date. This thesis explores several issues related with thermal decay processes and their results on dimension stones. The research has included the laboratory analyses of the thermal response of the stone to different ranks of temperature variations, as well as the influence that laboratory heating regimes may have in other decay agents, as salt crystallisation. This is complemented with the development of technological solutions for the laboratory testing of these agents, and case studies of a number of buildings affected by thermal decay processes.

## **1. Outline of Study of Thermal Decay Processes and Patterns in Natural Stone Masonry from the Architectural Heritage**

### **1.1. Introduction**

The possible influence of the radiative heat environments and the temperature changes within stone on its decay have been the subject of long discussion going back almost 150 years to the comments of Shaler (1869) who noted that the heating of the surface of a rock would tend to separate the outer portion of the rock from the interior mass tending to form a shell unless overcome by the cohesion of the materials. This debate has identified two fundamental mechanisms by which weathering caused by thermal stresses might occur: So-called ‘**insolation weathering**’ associated with environmental cycles of heating and cooling, and the ‘**thermal shock**’, which Yatsu (1988) associated specifically with fire spalling. The study of the first presents many difficulties. For example, repeated thermal changes act most obviously through fatigue effects, and therefore laboratory testing regimes are inevitably complicated and must reflect the variable thermal regimes experienced under conditions of natural exposure. In addition, insolation decay tests cannot be accelerated without changing the phenomenon itself, as opposed to the thermal shock promoted by fires, which can be modelled through comparatively short tests. In contrast any approach to the modelling of insolation weathering must involve protracted laboratory tests or the substituting of numerical models based upon a theoretical analysis of the strength/stress relationships encountered during heating and cooling and how they change over time.

The wide scope that there is for variations in experimental regimes has meant that numerous theories have grown up concerning the efficacy or existence of ‘insolation weathering’ – most often based on single experiments. As a consequence, insolation weathering has become ‘a dogma that is solidly accepted’ (Blackwelder, 1933), ‘a matter of speculation’ (Cooke and Warren, 1973), or an ‘academic abstraction’ (Camuffo, 1998).

In addition to this consideration, weathering agents invariably act synergistically and there are many feedback mechanisms that operate. Hence, it is inevitably incorrect to blame an isolated, individual agent for producing a specific pattern of breakdown or

weathering form. As stated by Cooke and Warren (1973) “the features alone may not reveal the processes which produced them”.

For example, depending upon the magnitude and distribution of temperature gradients within a rock, thermal changes may produce breakdown indirectly through its influence on other agents as salt crystallisation.

Stone breakdown processes are widely influenced by the scale at which weathering mechanisms act (Smith, 1996) and the frequency of heating and cooling cycles has considerable importance in the consideration of fatigue effects (Halsey et al., 1998). Stone exposed in any natural environment experiences a range of superimposed temperature cycles. There can be secular related to possible climatic changes, seasonal due to the variations of solar declination through the year, or diurnal. Moreover, short-term temperature fluctuations due to wind and cloud cover are superimposed on diurnal cycles (Jenkins and Smith, 1990; Halsey et al., 1998; Hall and Andre, 2001). Long-term fluctuations penetrate deeper in the stone and have slow rates of change, which allow the stone to reach progressive equilibrium states without important dynamic connotations. In contrast, the shorter the thermal fluctuation, the shallower the penetration of thermal waves within the stone. In this way the outer few millimetres of rock may be subject to numerous short-term thermally induced stress events (Camuffo et al., 1984; Warke and Smith, 1994). The high frequency of these short-term fluctuations of temperature may magnify even very small effects by terms of fatigue (Aires-Barros et al., 1975; Aires-Barros, 1977; Bernardi and Vincenzi, 1993). Thus, it is important that laboratory modelling of short-term fluctuations were related to high frequency monitoring of rock temperature changes monitored under conditions of natural exposure to insolation should be pursued in addition to experiments designed to replicate diurnal and larger-term temperature (Hall and Andre, 2001).

Fire has been classically considered as an important weathering agent in natural environments. Early observations of Blackwelder (1926) mentioned the forest fires as a major factor causing scaling of rocks. As in the case of insolation weathering, the initially geomorphologic concept was translated into building performance. Fire can be also taken into account as a decay agent on building materials (Winkler, 1997), as this agent produces effects in few minutes (Allison & Goudie, 1994). The study of the decay promoted in the building stones by fire is important in the context of the conservation of



historic buildings, as for example, it is thought that each day about one historic building in the European Union is damaged by fire and stone takes important part as building material in most of those historic buildings. (COST C17, 2001). Fire effects have been usually focused on the bulk mechanical and visual changes caused by the volume expansion of minerals at high temperatures and the reddening of stones containing iron (Ollier & Ash, 1983; Allison & Goudie, 1994; Winkler, 1997; Chakrabarti et al., 1996; Ehling & Kohler, 2000). Meanwhile, little attention has been paid to the mineralogical or textural changes and the references to this area are not abundant (Hajpál, 2002; Gómez-Heras et al., 2004b; Hajpál, 2004; Hajpál and Török, 2004). However, the direct observation of decay features at a micro-scale should not be neglected, as these shall be a key for understanding the processes at greater scales both in terms of space (i.e. fracture mechanisms and patterns within the stone) and of time (i.e. future physical behaviour of the stone).

Though both insolation weathering and fire decay find their cause in a same mechanism (temperature changes), they are quite distinct due to the different ranks at which this processes occur. While insolation process is a very slow process, the effects caused by fire are immediate. This has favoured that research about fire effects avoided the speculations that have surrounded to the insolation weathering, as the laboratory experimentation makes easier to find conclusive results with short tests. Moreover, there is a number of references of studies in which very high temperatures have been used as an attempt to accelerate the processes of stone degradation, pretending to study the effects on stone of the environmental variations of temperature (p. ej. Griggs, 1936; Aires Barros et al., 1975; Franzini et al., 1984; Siegesmund et al., 2000; Weiss et al., 2004; Koch y Siegesmund, 2004).

## 1.2. General aim and specific objectives

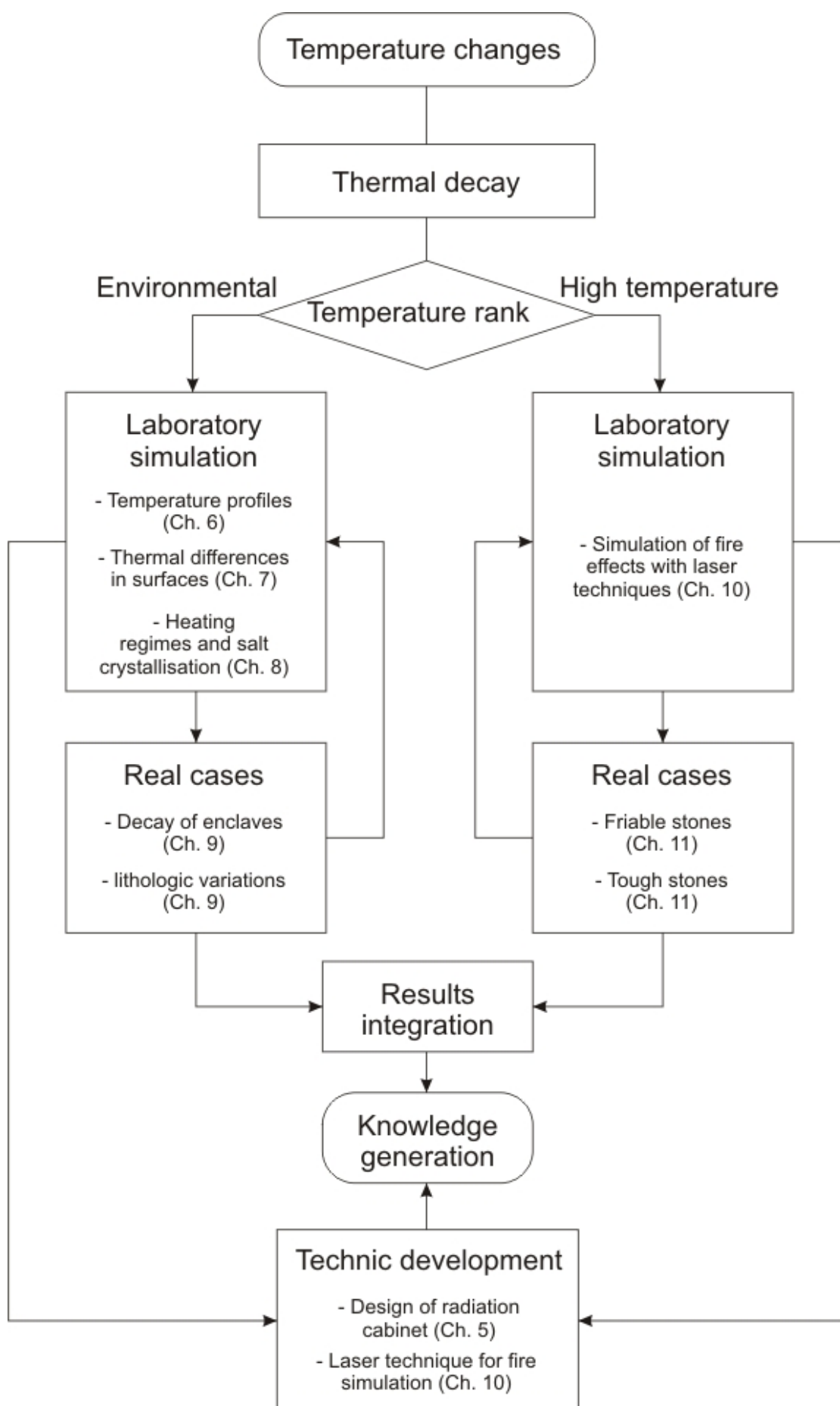
The overall aim of this thesis is to study the processes of thermal decay of building stones, both in the cases of environmental temperature cycling (i.e. thermal variations due to sunlight effects, in which has been classically called *insolation weathering*) and sudden high temperature changes (i.e. temperature rising due to fires) and the

identification of the decay patterns that they can cause in buildings. This overall aim has been achieved through the following specific objectives:

- Review of the state of the art of the subjects of insolation weathering and fire decay of buildings and building stones.
- Development of technological solutions for the testing of thermal decay both in terms of environmental temperature fluctuations and fire processes simulation.
- Laboratory study of temporal and spatial variations of temperature both in depth profiles and in surface of building stones fresh samples under convective heating cycles and simulated insolation regimes.
- Laboratory simulation of intense temperature increasing of building stones and evaluation of the physical and chemical variations induced within.
- Evaluation of the visual influence of heating regimes (convection and radiation) in other decay processes, such as salt decay, through laboratory experiments.
- Study of seasonal, daily and short term surface temperature cycling in determinate buildings prone to present temperature related decay forms.
- Study of the relation of breakdown decay patterns in buildings with their orientation and thermal microclimatologic conditions and evaluation of their probable thermal drift origin.
- Study of fire effects in historic buildings.
- Evaluation of the mechanisms of action of insolation and fire, their differences and similarities and their relation with fatigue and shock mechanical processes.

### **1.3. Methodology**

The flow chart of the figure summarizes the methodological design from which this research has been developed.



## **THERMAL DECAY OF STONE AT ENVIRONMENTAL TEMPERATURES**

### **1.4. Design of Automatic cabinet for monitoring thermal behaviour of building materials**

An automatic cabinet for ageing experiments on building materials is presented. The sample is subjected to infrared and/or ultraviolet radiation with previously programmed cycles of ambient temperature and rainfall conditions. The cabinet then monitors the evolution of the temperatures within the stone by means of thermistors and the strain distribution in depth by means of LVDT (Linear Variable Differential Transformers) transducers. The cabinet is specifically designed to model environmental conditions in temperate climates with radiant heat sources and to provide measurements of the temperature distribution within the material and of the dilatation in various depths. The automatic programming of the cabinet and the computerized acquisition of data allow to make long-term ageing tests in samples of building materials. It works autonomously over long periods of time, due to the computerized acquisition of the data. Therefore, ageing experiments can be made. The prototype offers as main advantages the possibility of being programmed with complex environmental cycles as well as offering coupled and continuous measurement of several parameters related with the thermal ageing of building materials (temperature and strain profiles). The apparatus design specifically focused on the control of the decay experienced by insolation and rainfall.

### **1.5. Depth temperature profiles under convection and radiation regimes: implications for rock spalling.**

The most usual disposition of a stone in construction is as a block or slab at the façade of the building. In both situations the material faces only one side to sun heating. This will tend to generate a temperature distribution within the material, in which the temperature will decrease from surface to the core of the stone, and intense temperature gradients will be generated due to the poor thermal conductivity of stone.

This is the base that sustain the theory of insolation as generator of thermal spalling, which has been the main issue in speaking of insolation weathering throughout all the history of this subject. To date, the majority of experiments and speculations concerning insolation weathering have modelled potential breakdown in terms of the vertical temperature distributions obtained from a single surface measurement and/or a limited set of arbitrary depth temperatures (Branner, 1896; Merrill, 1906; Roth, 1965; Peel, 1974; Smith, 1977; Winkler, 1977; Kerr et al., 1984; McGreevy, 1985; Jenkins y Smith, 1990; Hall y Hall, 1991; Galán et al., 1992; Warke y Smith, 1994; Warke et al., 1996; Halsey et al., 1998; Smith et al., 2000; Gómez-Heras y Fort, 2002; Iñigo y Vicente-Tavera, 2002; Turkington et al., 2002; Hall y André, 2003). These experimental procedures have thus contributed to a vision of the thermal gradients established within rock under insolation as the driver for breakdown through essentially planar patterns of damage (e.g. spalling) of noticeable thickness (see figure 6.1) resembling the damage caused by thermal shock during fires (Blackwelder, 1926; Chakrabarti et al., 1996; Dorn, 2003). It is accepted, however that temperatures decrease exponentially with depth and that the most rapid decrease is experienced in the first few centimetres.

The different thermal response of stone with regard to the heating regime (convection or radiation) is a fact (Warke y Smith, 1998). Nevertheless, to date the experiments comparing both regimes have not been made with comparable cycles of radiation and convection, as the employed convection cycles were based on two extreme temperatures in an stepped, and not sinusoidal, succession.

The aim of this section has been to obtain vertical temperature distributions of different building stones under analogous radiation and convection regimes (based on the temperature distribution during summer in Madrid with a range of temperature 23-37 °C) with special focus on increasing the temperature sampling density in relation with previous studies on the subject. The depth of penetration of different ranges of short period temperature cycling has been measured. Artificial ageing tests have been also carried out to explore the potential of establishing commercial tests for evaluating the *insolation weathering resistance* of stone materials.

Results show that both convection and radiation regimes generate a thermal anisotropy in the samples, expressed in an exponential distribution of temperature within the stone. Main differences between convection and radiation include the

maxima temperature attained in surface, and the rank of the thermal gradients within the stone. Both aspect are higher under radiation than in convection.

Albedo is the main control on surface temperatures under radiation. Lower albedo stones reach the highest temperatures under radiation, exceeding up to 19,6 °C the ambient temperature. There is not correlation between albedo and surface temperature under convection, although there are also differences in the response of stone under convection.

Thermal conductivity is the main control on the extent of the thermal gradients surface – subsurface and  $\Delta T/\Delta t$ . Thermal conductivity depends on the mineralogical composition, but also on the porosity of the stone. Dense acid granitic stones (quartz-rich) present the highest thermal conductivity values while porous calcareous stones the lowest. The thermal profile of stones with high thermal conductivity is sigmoid, while it is exponential in stones with low thermal conductivity, as the higher the thermal conductivity, the thicker is the overheated outer section of stone.

Heterogeneous stones present “anomalous” temperature distributions in the first 3 cm of stone due to the spiral distribution of sensors. This indicates that isotherms are not parallel to surface and therefore, deeper sensors can register higher temperatures than shallower sensors. The differences between the thermal properties of the rock-forming minerals conditions this curved isotherms distribution. Any type of heterogeneous stone is, therefore, not defined by an unique thermal distribution but rather than a set of profiles as figure 6.22 shows. This complicates the conception of a slices model for thermal decay, that only would be applicable in the deeper (> 3 cm) sections of stone, where thermoclastic processes are less probable .

The model of curved isotherms reduces the relative importance of the shear and tension stresses parallel to the surface (which are the mechanisms proposed for the generation of thermal spalling) and increases the importance of a three-dimensional field of stresses in the outer part of the stone (which would make more probable non-directional decay processes as granular disaggregation).

Different ranges of short-term radiation heating cycles show that the stone only responses with noticeable thermal gradients in the first two centimetres to the shortest

cycles. This depth is coincidental with the volume where the model of curved isotherms is applicable.

In light of these considerations, the dark porous calcareous stones would be the most susceptible to experience thermal spalling (higher heat absorption, lower thermal conductivity and homogeneity, which is expressed in parallel isotherms) while non-porous leucogranitic stone would be the less prone to thermal spalling.

Results of artificial ageing tests showed no results after 600 cycles correspondent to 100 days of experiments. Acceleration of insolation weathering is not possible and numerical methods (as Finite Elements Modelling) should be pursued to laboratory model of the effects of insolation.

#### **1.6. Surface temperature differences between mineral grains: implications for granular disaggregation.**

Thermal expansion differences between mineral grains within rocks under insolation have previously been assumed to drive breakdown by means of granular disaggregation. However, there have been no definitive demonstrations of the efficacy of this weathering mechanism. Different surface temperatures between minerals should magnify thermal expansion differences, and thus subject adjacent mineral grains to repeated stresses that might cause breakdown through fatigue failure. The more frequent the thermal fluctuations, the more effective these fatigue processes should be. This work confirms the existence of surface temperature differences between minerals in granitic rocks, possibly as a function of its different thermal properties, under simulated short-term temperature fluctuations so as to discriminate its potential for initiating granular disaggregation. Although many factors determine the intensity of temperature differences, the influence of colour, as a surrogate for albedo, and grain size, as a function of thermal mass are specifically identified because of their ease of quantification. Four rock types with a range of these properties were examined, and subjected to repeated short-term temperature cycles by radiative heating and cooling under laboratory conditions. The measurements of surface temperatures were carried out with infrared thermometry.

It can be concluded that there are differences between the surface temperatures of the different minerals of a stone. Although these differences are small compared with those obtained when the surface temperatures are compared with the temperature at an arbitrary depth point of the stone, they could be enough to favour granular disaggregation through fatigue effects, as they will introduce stress fields in the stone surfaces more complex than those we can take into account if we consider the surface as an homogeneous body.

The existence of these differences highlights some important issues regarding the study of thermoclastic effects. Firstly the importance of fine sampling in the survey of stone temperatures, both in the measurement of profiles and at the surface. Granular disaggregation due to thermal differences between mineral grains could be considered the main mechanism by which so called ‘insolation weathering’ could have a direct control on weathering. Therefore the detailed study of shear stresses between mineral grains would be more important than the tensile effects of the dilatation of stone slices. The use of average surface temperatures is a simplification, which masks the effects in surface that are more frequent than the ‘depth’ effects suggested by theories of failure through deeper seated effects such as multiple contour scaling or failure by progressive “slicing” of the stone.

One of the most important methodological conclusions of this work is that the magnitude of these differences counsels the use of non contact sensors. Up to date, most of the studies on the thermal response of stone surfaces to radiation heating had been based in the use of thermistors or plates fixed to the surface. The use of non-contact temperature measurement devices neglect the perturbation that contact sensors cause due to the thermal properties of the sensor itself.

The fact that seemingly the most important temperature differences and steepest temperature gradients are found during initial ramping up and down gradients of heating and cooling cycles suggests that climates prone to cause thermoclasty may not be necessarily extreme as those that have been usually proposed. Middle latitude climates can provide numerous periods of rapid rise and fall of temperature. In this way, thermoclasty must not be considered only from the point of view of the temperatures attained, but also from the number of short-term variations caused by wind or cloud cover: Fine sampling is therefore important both in the space and time.



### 1.7. Influence of heating regimes in salt decay patterns

Crystallization of soluble salts within the pores of the stone is widely recognised as a major mechanism causing the deterioration of monuments and architectural heritage (Schaffer, 1932; Correns, 1949; Winkler, 1973; Price, 1996; Goudie & Viles, 1997; Benavente et al., 1999; Flatt, 2002; Gómez-Heras et al., 2004a) and temperature is one of the main controls on the crystallisation dynamics.

The temperature controls the free energy ( $\Delta G$ ) of the saline solutions, and therefore the salt precipitation. Temperature also controls the pressure of crystallisation salts. In addition thermal expansion of salts is much greater than the thermal expansion of host rocks, such as granites or limestone. Therefore the distribution of temperatures within the material is of great importance for considering the mechanisms of stone decay by salt crystallisation.

As most (if not all) laboratory experiments on decay generated by salts are carried out with convective heating regimes, the aim of this section is to assess the morphologic differences and changes in distribution of salts within a porous stone tested with different heating regimes (convection and radiation)

Results show that heating regime noticeably controls the salt distribution within a porous stone. In the case of sodium chloride, radiation heating favours the generation of subefflorescences, while convection heating promotes the formation of efflorescences. This has a clear implication both on the stone decay in natural environments and on the methodologies for testing salt decay, as subefflorescences are more destructive than efflorescences.

In natural environments this means that in a building, stones in insolated areas will be more susceptible to present spallings related with sodium chloride crystallisation than other areas with insolation, in which the efflorescence of sodium chloride will generate more aesthetical damage and less mechanical breakdown of the rock.

Regarding laboratory experimentation, the use of convective heating will underestimate the potential damage that sodium chloride may generate, and counsels the use of radiation heating test methods for the laboratory study of salt crystallisation.

## 1.8. Influence of the thermal microenvironment in the decay of buildings

After the laboratory testing on thermal response of stony materials under radiation environment, this section studies the influence that environmental thermal variations may have in the decay of some structures in stone exposed to natural environments in buildings.

Surface characteristics of materials, as could be the albedo, have a key influence on the thermal behaviour of the stone even to the level of mineral grains. Therefore the existence of adjacent wider areas with different properties regarding the absorption of radiation may generate microclimatologic changes in the building that shall influence in several decay processes. The coexistence of areas with different thermal response in a building can be a product of ‘natural’ causes (i.e. petrologic variations, presence of xenoliths, differences in orientation) or be generated ‘artificially’ due to the specific design of a building (i.e. utilization of different stone varieties). The study of the thermal evolution of the materials placed in a heritage building includes a limitative factor in comparison with the laboratory studies, as they must be protected and intrusive tests (as for example drilling to place thermistors) should not be made.

This section studies the variations of surface temperatures in different areas and structures of two heritage buildings: *Main Building of Consejo Superior de Investigaciones Científicas* (1943) and *Panteón de Hombres Ilustres* (1899). First building was selected as an example of ‘natural’ variations of surface thermal properties (as it is built with an enclave-rich granite), and the second one was selected as an example of ‘artificially’ generated petrological variations (It was made with alternative lines of two types of limestone, black and white). These buildings were selected also because although having a recognised heritage value, they were built recently enough to better discriminate in what extent the thermal differences between material could be a predominant reason for decay in relation with other decay factors. The study of an older building may make more difficult this discrimination as they have a more extended and complex decay history and they are more likely to present a convergence of decay patterns. These buildings were selected also because they were made with scarcely-porous materials, so that the effect of humidity would be less significant.

### **1.8.1. Thermal microenvironment and decay of microgranular enclaves: Central building of the Spanish Higher Council for Scientific Research (CSIC)**

Among other non-stony materials, the Main Building of the CSIC was built in 1943 with two types of stone: Guadarrama's granite and Colmenar's Limestone. The basement of the façades is built with this type of monzogranite which is very rich in microgranular enclaves. About a 25 % of these enclaves present some type of spalling decay patterns. Two types of decay patterns are observed: Firstly, spalling crossing these structures and affecting indifferentially to the enclaves and the host rock (66 % of the decayed enclaves, see figure 10.5 left), and secondly, microspallings confined to the enclave that do not affect to the host material (34 % of the decayed enclaves, see figure 10.5 right).

Morphological measures of the enclave and the decay patterns were made in addition to petrological and electronic microscopy observations of both types of damaged enclaves and host rock. Evolution of single surface temperature and humidity of the enclaves and the host rock were measured in eight selected points along the building during four days during a year (selected around solstices and equinoxes). These points included unspalled enclaves and differentially spalled enclaves. An isotherm mapping of an area of host rock including an enclave was also made for the insolation period of a summer day.

Results showed that decay patterns of the enclaves that have spalling features crossing the structures and affecting indifferentially to the enclaves and the host rock, are mainly the result of water-related processes. They present features, as microbiological colonisation or salts, that indicate this origin (figure 10.16). Thickness of host rock and enclaves converge to a value that differs with the thickness of the other type of decayed enclaves, suggesting a different origin for each one of these types (figure 10.13).

Contrarily, the decay patterns in enclaves with microspallings confined to the enclave that do not affect to the host material seem to be mainly the result of temperature variations. Reasons to attribute a mainly thermal-based origin to these patterns are:

- Differential thickness (figure 10.13) in relation with water-generated spalling.

- Breakdown patterns (figure 10.15) in which intracrystalline and transcrystalline ‘shock-related’, Griffith-type fissures are predominant.
- Absence of relevant humidity differences between the decayed and undecayed materials along microenvironmental measures.
- Existing direct relation between the extent of thermal differences and number of thermal cycles and the existence of this decay features.

Regarding microenvironmental measures, enclaves behave as a ‘hot spot’ within the host rock (10.22-24) and therefore will expand more than the host rock, being likely to experience a confining pressure.

Microenvironmental measures during selected days (Tables 10.6, 10.7; Figures 10.18) show that the existence of damaged enclaves with spallings confined to them has a deep correlation between the number of gradients greater than 2 °C/min per day and the number of insolation cycles per hour. Differences between maximum and minimum temperatures of the enclaves for each day is also a factor with direct correlation with the existence of this type of decay patterns. Minor correlation is also showed by the values of temperature differences between enclave and host rock.

North façade shows an homogenisation of temperature regimes while south façades show the highest and lowest values of the indexes selected to discuss the thermal evolutions, as they are very sensitive to the values of sunrays inclination.

### **1.8.2. Artificial lithological variations and temperature, thermal incompatibilities: the case of the Pantheon of Illustrious Men.**

The Pantheon of Illustrious Men was originally built as the cloister of what was going to be the new *Basilica of Our Lady of Atocha*. The works began in 1892, but the initial project, of neo-Byzantine style, was not finished and the works ended in 1899. Only the cloister-pantheon and the bell-tower were built. The building has a rectangular ground plan with three corridors enclosing an open central square courtyard. Its façades face approximately as the Central building of the CSIC, north, east (main façade), and south. The external façades are rendered by alternating courses of white (Torrubia) and black (Calatorao) limestone.

The concept of “incompatibility of materials” has been used to refer the eventual acceleration of the stone decay due to the coexistence in a building of materials with very different properties (e.g. Aires-Barros et al., 1998; Fort et al., 1998; Cultrone et al., 2001; Gómez-Heras and Fort, 2004a). Anyhow, there is not reference of studies relating different thermal responses of coexistent materials with the degree to which decay affect them.

The main decay features observed on the façades are fractures on the stone rendering of the building. There are two scales of fractures: Firstly, great scale vertical fractures that affect mainly to the white limestone blocks. These fractures are caused by processes of settlement of the building and are presently inactive. The differential distribution of the fractures is caused by the different thickness between black and white limestone blocks (Álvarez de Buergo et al., 2004). Secondly, loss of scales in the corners and edges of black limestone blocks that produce their rounding and notching of the blocks due to their larger thickness.

A water-repellent treatment was applied during the 1990's on the façades. This treatment produced an intense surface colour change, as well as an increase of gloss of the stone blocks. There is a noticeable loss of treatment in some areas of the building due to processes that may be related with insolation of surfaces.

The aim of this section is to assess the relation between thermal response differences and the rounding of stone blocks. A positive relation would conduct to consider these materials as incompatible from the point of view of thermal properties. The influence of temperature and insolation rates on the decay of protective treatments is also studied. Finally, this section identifies how moderated minus zero environmental temperatures may not be reflected in actual freezing conditions within the stone.

Results show intense differences of temperature between black and white limestone blocks, and between treated and untreated surfaces. There is a noticeable correlation between the existence of numerous short-term heating cycles and a larger rounding of stone blocks. The main constant cause of short-term cycling is the presence of trees and architectural features shadowing some areas of the façades.

The loss of protective treatments is directly related with the persistence of extreme temperature regimes, related with the façades aspect and the angle of the stone surfaces

with the vertical plane. South façades, and stone surfaces inclined with respect to the vertical plane are the most sensitive to thermal decay of protective treatments.

Inclination of surfaces and albedo, and therefore, the degree of incident and absorbed radiation are of crucial importance in environmental regimes with temperatures around 0 °C. Moderated below zero regimes, as those found in Madrid, do not always involve freezing conditions within stone. Lower albedo materials placed not vertically, as in sills or balustrades, absorb more radiation and do not attain the freezing point, even in moderated below zero environmental conditions.

## **THERMAL DECAY AT HIGH TEMPERATURES**

### **1.9. Fire decay simulation by means of laser techniques.**

Stone behaves as a dynamic material, which does not remain static once it is placed in the building. Dynamic loads, weathering agents, generate continuous changes into the material, which in any time of observation will present a differentiated ‘state of decay’ depending on the peculiar history of stress and decay. Therefore, the study of such an instantaneous decay agent as fire must take especially into account the history of decay events (figure 10.3).

Many authors suggest the use of fresh quarry samples as standard of comparison to establish the state of decay (Fort et al., 1996; Rodríguez and Alcalde, 1998; Alvarez et al, 2002). This baseline is also often applied for example in the evaluation of protective treatments (Villegas, 1991; Esbert and Alonso, 1995). However, the irruption of a punctual decay process, as it is the fire, is superimposed to the previous decay processes. Therefore, the use of material from the stage immediately before the punctual agent (fire) is strongly encouraged to establish a suitable baseline to assess the decay generated by fire itself.

The use of fresh quarry samples as baseline to state the degree of decay would conduct us to a situation in which the previous decay processes history is neglected. The

analyses of the real degree of decay will conduct to the assessment of a decay degree greater than the actually occurred if the state prior to irruption of fire is considered the baseline.

Another aspect of the misuse of fresh quarry samples would be related with their use in models of prediction through laboratory testing. Results of laboratory tests carried out with fresh quarry samples will underestimate the damage that an eventual fire could cause in the same material in the building, as this last presents a pre-existing decay degree as discussed before.

This only can mean that unaffected areas of the building itself must be selected for sampling and that any change has to be detected by comparison between the unaffected and affected areas of the same material. Thus, the use of samples from the building is strongly encouraged. The use of building samples has also a negative effect, which is the necessary loss of the fragments sampled. Nevertheless it makes possible a more correct approximation to the real processes that take part on the decay generated by fire.

Up to date laboratory simulations presented in the literature has been carried out with ovens (Goudie et al., 1992; Allison and Goudie, 1994; Chakrabarti et al., 1996; Hajpál, 2002, 2004, Hajpál and Török, 2004). Oven-based testing of building materials is quite sample costly. This constitutes a handicap to use this kind of techniques in heritage materials as it would mean the sampling of great amounts of stone from the monument for making the tests, when the amount of sample obtained from a test in a punctual area would be enough. In oven-based techniques, also “*the test conditions do not fully reflect the processes that take place during natural fire*” (Hajpál and Török, 2004; p.312), as the main mechanism of stone heating during a fire is the radiation (Ollier and Ash, 1983).

Laser allows obtaining a highly energetic radiation concentrated in a small area. Laser technology is expensive and not easily available but allows to make experiments in very small areas. This is compatible with the test of small samples at a micro-scale taken from a heritage building, as laser permits the realization of several fire tests in a small sample..

## **1.10. Effects of fire on historic buildings**

This section studies cases of buildings affected by real fires. In site observation of the behaviour of the stones after a fire allows to separate two groups of materials on the basis of this behaviour:

- Friable materials, in which fire do not generate noticeable syngenetic mechanic effects.
- Tough materials, where syngenetic breakdown of stone after fire is evident.

Attending to this preliminary classification, the behaviour of four stone types in historic buildings after real fires was studied. These stone types included two sandstones, one dolostone and one granite.

### **1.10.1. Friable stones**

The aim of this section has been to characterize mineralogical and textural changes in different types of matrix of building sandstones affected by fires in the past. Two different types of sandstones with intense colour changes after fire events were selected in order to study the variations in both siliceous (argillaceous) and calcareous matrix: Firstly, a calcareous lithic sandstone with calcite-rich matrix, and secondly, a subarkose with clay-rich matrix (smectite and palygorskite).

Results show how several compositions of sandstone lead to dissimilar behaviours when they get burnt in a fire. The importance of the effects observed is directly related to the mineralogy of the matrix. Building fires do not affect severely the bulk properties of Uncastillo sandstone, and the main whole-rock damage is the result of the visual impact that the intense change in colour causes. However, fire harshly weakens the bulk structure of Villamayor sandstone.

Analytical tests confirm the field observations of the buildings made of these sandstones. On one hand, there are not inherent differences in the decay rates of Uncastillo sandstone if we compare unaffected and affected areas of buildings constructed from 1<sup>st</sup> to 20<sup>th</sup> century. Nevertheless, some weathering forms, such as scaling, caused by other weathering agents, have their detachment planes related to



interfaces between unaffected and affected parts of the stone. On the other hand, Villamayor sandstone shows how the fire may accelerate the decay rates of the stone, producing short-term (few years) bulk effects as cracks and scales due to fire-related weakening.

Macroscopic structural changes are directly related to the microscopic effects of fire. Skeletal grains of any of the two types of sandstone did not experience major effects due to fire. In spite of this, main changes are located within the matrix. Changes within the matrix of Uncastillo sandstone are slight. No changes in the original mineralogy were detected and the calcareous matrix remained unaltered. Chemical composition varied due to the iron oxidation, which even when it is found dispersed, it is responsible for the intense reddening observed in the stone. Ashes and fumes introduced new chemical components in the matrix as carbon and sulphur compounds. Elimination of smaller pores may be due to coalescence phenomena related to processes during calcination of calcite (Boynton, 1980). From these facts, temperatures attained in the fire were higher than 300 °C, i.e. the temperature required for thermal oxidation of iron (Chakrabarti et al., 1996), but lower than the temperature required for limestone calcinations (812 – 1100 °C, depending on authors).

Matrix of Villamayor sandstone experienced more complex processes due to the fire. Folded textures found by microscopic observations of palygorskite, together with the small changes detected in the XRD reflections at 10.5, 4.5, 3.68 and 3.23 Å, show that this mineral experienced structural changes during the fire, due to dehydration and dehydroxilation. However, this mineral still has been detected in the affected areas. Thus, rehydration of this mineral occurred after the fire event. FT-IR patterns show that affected samples have experienced noticeable loss of zeolitic water. These facts point out that the fire event did not reach a temperature high enough to promote a totally irreversible dehydroxilation of the palygorskite, but high enough to cause strong dehydration. Maxima temperatures attained during fire would have range from 400 to 540 °C, which are the maxima temperatures proposed to allow some rehydration of palygorskite (Preisinger, 1963; Hayashi, 1969; VanScoyoc et al., 1979).

The temperature reached in the stone surface due to fire was not either high enough to cause irreversible changes in the structure of smectite. Nevertheless, accurate changes experienced by this mineral could not be assessed because smectite is a minority

mineral with regard to the palygorskite, and some of the characteristic features related to dehydration-rehydration processes could not be observed.

Chemical composition varied due to the same reason that in the Uncastillo sandstone. Ashes, fumes and smoke from combustion introduced new elements such as P, S, Cl and N. High contents of C-compounds and ashes were also responsible for the thick black layer observed in this samples. Changes in the porosity and its distribution are related to both the matrix changes and the introduction of residues from combustion.

The main conclusions derived from this study are that sandstones affected by fires do not show instantaneous severe bulk effects as those shown by igneous rocks, where mineral expansion results in an immediate breakdown of the rock. The quickest most severe macroscopic effect have to do with the aesthetical aspect of the stone, since the oxidation of little iron contents due to heating, may lead to strong changes in the colour of the stone. Nevertheless, fire can promote short-term (years) damages in the sandstones.

Studies on the mineralogical and textural changes experienced within sandstones during fire are a way of determining the maxima temperatures attained during the fire. Studied cases correspond to fires fed with similar fuels and thus, with similar attained temperatures; consequently, the different behaviour of these sandstones depend mainly on the dissimilar matrix composition. Effects in clay matrix sandstones are more severe than in calcareous matrix sandstones, which should reach very high temperatures to experience mineralogical changes.

### **1.10.2. Tough stones**

The aim of this section has been to characterize the textural changes in two different types of tough stony materials. These were selected in order to study the variations in calcareous and granitic tough stones. Therefore, a micritic dolostone and a monzogranite were selected.

Results show that the main effect of fire in tough stones is the modification of porous system due to the generation of fissures. New fissures are developed because of the

differences in thermal dilatation between minerals. This is coupled with the growth of pre-existing microcracks. The absence of matrix, which in friable materials muffled the effects of thermal expansion mismatch, and the low porosity, which conditions a greater packing of the minerals, favour the generation and propagation of fissures.

The dolostone resists mechanically the action of fire. Fire does not produce mineralogical variations. Porosity increase slightly. Microscopic observations detect small fissures along cleavage planes of dolomite crystals. Nevertheless, there is not a substantial generation of fissures. The relatively high porosity of this stone produces the buffering of thermal expansion, as the grains may expand in existing voids without displaying a measurable displacement.

The granite does not present mineralogical changes due to fire but presents important processes of microcracking. Porosity after fire is twice the initial. The granite develops inter-, intra- and transgranular fissures. Intergranular fissures are the most important in granular disaggregation processes, while intra- and transgranular fissures favours stone spalling. Two main groups of fissures appear: Firstly, a group of intra- and transgranular fissures parallel to surface, and secondly, a group of intergranular fissures perpendicular to the surface. Surface grains are the most fissured ones, presenting mainly intergranular fissures. In the most external zone (first half centimetre) the three types of fissures are observed. After, there is a zone (0,5 – 1 cm depth) without transgranular fissures. From 1 cm depth only intergranular fissures are present, and from 1,5 cm depth stone does not present fissures related with the fire.

Microscopic techniques allow quantifying fracture system and establish differences between different types of fractures according to Griffith fracturing criteria; those data that we cannot obtain from the mere value of ultrasound propagation velocity, which only gives a quantification of the overall ‘quality’ of the stone after fire. Digital image processing and analysis techniques of images is a useful methodology to study the fracturing of stone during a fire.

Intergranular fissures are the first to develop, as the crack resistance energy for grain boundaries is lower than for bulk elements. Cleavage lines, pores and previous fissures nucleate intragranular fissures at a later stage. The cracking behaviour of the different minerals is quite distinctive. The cracking of quartz – feldspar grain boundaries is more frequent than the cracking of quartz – mica or feldspar – mica boundaries. The feldspar

– feldspar grain boundaries are the less frequently cracked. Feldspar is the mineral where more density of intragranular cracking is found, followed by quartz and mica (if we exclude the widening of cleavage planes).

The increase of porosity through the generation of fissures has as most noticeable effect after fire. The increase of porosity produces the acceleration of the alteration to sericite of the feldspar in the outer portion of stone.

### **1.11. Shock and fatigue in thermal decay**

Studies on the processes of thermal decay have simplified them to a direct relation insolation weathering – fatigue and fire decay – shock. *Fatigue* can be defined as a mechanical failure due to accumulation of stress. Contrarily, *shock* is a mechanical failure generated in a single episode by an unitary stress.

Within the case of the thermal decay processes, the accent has been put on the rate of expression of these mechanisms in a decay pattern, and not on the reality of the mechanical failure process occurred. This simplification should be considered incorrect, as depends on the scale of the observations and not on the study of the stone mechanics.

The research carried out in this thesis has shown several examples of how different scales of observation may modify the perception of a decay process. For example, fine spatial sampling of temperatures within a stone changes a model in which insolation would generate planar decay patterns into a model considering a non-directional breakdown process. Short time periods of temperature sampling show the great importance of short-term small fluctuations of temperature as generators of gradients above the limit proposed as baseline of shock failure in the stone. Microscopic observations of stone after a fire may show effects that in a long term will accelerate decay processes in an apparently intact stone.

The fact that some thermal decay patterns appear faster than others is not reason enough to assess a determinate process. The decay processes should not be discussed only on the basis of the decay patterns. What is called thermal fatigue could be sometimes, in fact, a sum of small shocks, as the shorter the considered time or the more detailed the observation scale, the more important shock patterns become. Analogously,

an instantaneous process of thermal shock may be only the result of a previous stress history dominated by fatigue.

The results of this thesis show how both insolation and fire generate breakdown patterns that could be addressed both to shock and fatigue. Further research should explore the accuracy of the absolute equivalences insolation weathering – fatigue and fire decay – shock.

## **1.12. Conclusions.**

Insolation weathering is present in stony materials, although its scale is more limited than previous studies have addressed. Insolation weathering in middle latitudes is a small scale physical process, which is limited to very specific environmental, lithologic and structural situations (mostly lithologic heterogeneities). Where temperature fluctuation in the environmental rank is idealized as an isolated agent in relation to other common decay agents (pollution, salts, etc), it is found firstly that temperature has a very limited efficiency in relation to these other agents, and secondly, that it doesn't generate significant structural or visual damages. Thus, stone masonries insolation weathering can be considered an existing process itself albeit of scarce importance in general building stone decay.

Additionally, if stone decay is considered the result of a set of agents acting in a synergistic way, the influence of environmental temperature fluctuations in other agents (as salt weathering or freeze-thaw) is also significant. The effects of the sunlight radiative heating must therefore also be pertinent to building decay, which must be taken in consideration in designing accelerated ageing experiments, especially for the testing of the “main” agent.

The practical implications therefore of preventing heritage loss due to insolation weathering are restricted. Excepting cases of lithological heterogeneities generated artificially during the design of buildings, or the inclusion of structural elements or surrounding items that create shadowing in the façades, the possibilities of preventing the effects of overheating due to solar radiation are few if any.

In contrast the fire represent one of the preventable most destructive processes of stone decay. Fire generates chemical and/or physical decay of stones, depending upon the stone burnt. Fire produces decay both in the short and long term. In the short term, it generates noticeable visual and structural decay. In the long term, the compositional and textural changes may accelerate the action of other decay agents. Also, the products of combustion (such as fumes and ashes) that are introduced within the pores of the material may generate salts, which affect the further durability of the materials.

Regarding the laboratory testing of stone in relation to fire, the use of methods that utilize the building or monument samples require improvement, to take into account the previous decay history of the material. Sample-friendly methods with radiative heating therefore must be used to minimize building sampling, while adequate laboratory tests are also required to test the real heating dynamic of this agent.

The general conclusions above can be categorized to include the following points:

**The varying thermal response of stone exposed to radiative and convective heating.** Radiative heating generates a greater thermal anisotropy within materials than convective heating. As a result, the temperature gradients within stone are greater with radiation than with convection. In building environments this is documented by faster decay rates in stone of insulated areas (exposed to radiative heating) than in stone of areas without insolation (exposed to convective heating).

**The thermal response of stone exposed to radiation is, in general terms, conditioned mostly by Albedo and thermal conductivity.** Albedo is the property that controls mostly the surface temperature of stone (the lower the albedo, the higher the surface temperature) whereas thermal conductivity mainly controls the intensity of the internal temperature gradients (the lower the conductivity, the more intense the gradients). These properties are not only a function of the mineral composition, but also of the texture: the greater the porosity of a material, the lower is its thermal conductivity.

Isotherms tend to be distributed parallelly to the surface in monomineral stones exposed to radiation. Therefore, **highly porous, low albedo, calcareous stones would be the most susceptible materials to develop planar decay forms (spalling) due to**

**insolation**, as their lowest values of thermal conductivity, higher heat absorption and homogeneity. Nevertheless, due to the high porosity, the probability of undergoing thermoclastic processes is significantly lower than the probability of undergoing wetness-related processes.

**Surface temperatures are not homogeneous in polymineral stony materials exposed to radiation.** In addition to the albedo, thermal conductivity and heat capacity differences, the size of minerals influence the thermal differences at a small scale. This is because larger minerals need more time to attain a thermal equilibrium with the surroundings than smaller ones.

Isotherms are curved planes, sub-parallel to the heated surface, in polymineral stones exposed to radiation. Therefore, **heterogeneous stones with low porosity would be the most susceptible materials to develop non-directional decay forms (like granular disaggregation) due to insolation.** Curved isotherms make less significant the directional tension and shear stresses parallel to the surface. At the same time, the significance of a three-dimensional stress field in the outer portion of stone increases.

Nevertheless, since the confining load in the surface of the material is lower than in the interior, the disaggregation processes in the surface are more likely than the generation of spalling in a deeper plane. **Insolation weathering thus will generate more disaggregation or micro-spalling than greater scale spallings.**

The long term insolation cycles have slow change rates and penetrate deeply in the stone. This allows for the stone to reach a progressive equilibrium state. Therefore, the temperature gradients generated within the stone are smooth. However, the short term insolation cycles have stepped change rates and do not penetrate deeply in the stone and with stepped change rates. Hence, **the short term insolation cycles are more effective on insolation weathering than the protracted heating of materials.**

The most important temperature differences and steepest temperature gradients are found during initial ramping up and down gradients of heating and cooling cycles. This suggests that climates prone to cause thermoclasty may not be necessarily as extreme as those that have been usually proposed. Middle latitude climates can provide numerous periods of rapid rise and fall of temperature. In this way, **thermoclasty must not be considered only from the point of view of the temperatures attained, but also from the number of short-term variations caused by wind or cloud cover.** An extreme

climate may not favour necessarily an extreme response of the materials. For example, for a south orientation in summer with a very long insolation time and with the highest environmental temperatures of the year, the thermal response of the stone is relatively moderated due to the low incidence angle of sunrays.

The elements shadowing discontinuously the buildings multiply the number of heating-cooling cycles on the façades. **The structural elements of the building as well as the surrounding elements (trees, other buildings, etc.) that shadow discontinuously the façades of a building favour the insolation decay.**

**Fine sampling of temperatures is of crucial importance in the studies on insolation weathering, both in terms of space and time,** as the main mechanisms by which insolation acts are confined to small temporal and spatial scale.

Insolation weathering is in middle latitudes scarce but present, and in any case very slow. **The probability of the existence of thermoclastic phenomena increases with the presence of heterogeneities in the surface properties of the stone** (especially those related with the albedo).

The protective treatments (consolidants and water-repellents) may change the surface characteristics of the stone and its thermal response. **Thermal processes related with insolation accelerate the ageing of protective treatments of stone.**

Heating regimes affect to the crystallisation of salts in porous stones. In the case of sodium chloride, **radiative heating favours the formation of sub-efflorescences in the stone**, which are more destructive than the efflorescences appeared in convective regimes.

In soft freezing environments ( $-10 - 0$  °C), the stone may not reach minus zero temperatures when insolation rates are high. As a result, the water within pores may not be freezing even when the ambient temperature is below 0 °C. Therefore, **the planning of a freeze-thaw test of stone in a determinate building must take into account the real evidences of stone temperatures and not the environmental temperature regimes.**

Any laboratory study on decay processes of stone or accelerated ageing should be made in climatic cabinets with radiative heating. Only in this way, the influence that insolation has over the decay process will be taken into account.



Fire generates chemical and/or physical decay of stones, depending upon the stone burnt. **Aesthetic disamenity is the most noticeable change generated by fire in stones with iron, due to its thermal oxidation at 250-300 °C.** The oxidation of very small amounts of iron may cause intense colour changes due to the high chromophorous capacity of iron.

Coniferous wood is the main fuel in the studied fires. Coniferous wood is common in Spanish historic buildings, as it was the traditional material for beaming. **The average temperatures of a fire in a historic building with coniferous wood as main fuel is about 500 °C.**

Two groups of stones can be established on the basis of their behaviour on a fire: friable and tough materials. **Friable materials, as sandstones, do not experience macroscopic mechanical breakdown after fire and the main effects are related with chemical changes within the matrix.** Calcareous sandstones show changes related with calcinations of calcite from 800 °C. In siliceous matrix sandstones, structural changes of clay minerals are predominant from 250 °C.

**Tough materials experience physical breakdown due to the fissuration generated by differences on thermal expansion of minerals.** The absence of matrix, which in friable materials muffles the expansion of mineral grains, favours the mechanical breakdown. The scarce porosity also favours the mechanical breakdown due to the greater packing of minerals in the stone.

**Calcareous materials, both friable and tough, are more resistant to fire than siliceous** because the necessary temperature for changes in calcite is unusually high in heritage buildings.

**Combustion residues produce effects in the stone that may extend at a long term.** Smoke and fumes soil surfaces, adding further discolouration to the generated by iron reddening. Fumes and ashes introduce new elements, such as carbon, sulphur, nitrogen, phosphor, etc., within the pores of the stone. The combination of these elements with the alteration products from the stone may generate salts, such as sulphates, nitrates or phosphates. This may have severe consequences in the future decay of stones.

**Laser techniques are very suitable to model the fire conditions in building stones.** The advantages of laser include the small amount of sample needed to make tests (which allow the use of samples from the building), the fidelity in reproducing the physics of burning process (by radiation), the easiness of data logging during experiments and an exhaustive control of the experimental parameters, which guarantees a high repeatability of experiments.

**The equivalences fire – thermal shock and insolation weathering – fatigue should not be taken as absolute** and further research should not just consider the time of appearance of decay forms to state a determinate mechanical breakdown process.

## **2. Objetivos**

El propósito general de esta tesis doctoral es el de aproximarse desde una perspectiva múltiple al deterioro térmico que la piedra de cantería puede sufrir, tanto en el caso común de las variaciones de temperatura en el rango ambiental (es decir, las variaciones térmicas debidas a los efectos del calentamiento solar, en lo que se ha dado por llamar clásicamente *meteorización por insolación*) como en los casos más peculiares de altas temperaturas ocurridas a causa de un incendio. Esta investigación además ha tenido como objetivo primordial, dada la ausencia de métodos experimentales adecuados para los fines de esta tesis, el desarrollo tecnológico como complemento desde y para la investigación de los fenómenos térmicos. El planteamiento de esta tesis se ha realizado pues abordando diferentes problemas que cubrieran los binomios alta temperatura – temperatura ambiental y aproximación experimental – aproximación real. Esto se ha conseguido a través de los siguientes objetivos específicos:

- **Revisión de los antecedentes y estado de la problemática referente a la meteorización por insolación y al deterioro de los edificios y piedras de construcción debido al fuego.** En el caso del deterioro producido por la acción del calentamiento solar, se ha venido discutiendo incluso la mera existencia de este proceso desde hace aproximadamente un siglo y medio y las opiniones vertidas al efecto han sido altamente contradictorias, sin embargo las evidencias experimentales son muy limitadas y a menudo fallidas, lo que hacía necesario un especial cuidado en la aproximación histórica de la cuestión. Por el contrario, el efecto dañino del fuego sobre los materiales pétreos de construcción es un tema que ha alcanzado un consenso en la comunidad científica, aunque también adolece de una falta importante de referencias experimentales anteriores.

- **Desarrollo de soluciones tecnológicas para el ensayo del deterioro térmico, tanto en lo referente a fluctuaciones ambientales como en la simulación del proceso de quemado.** La falta de equipos experimentales específicos para el estudio de este tipo de deterioro y la obtención a lo largo del desarrollo de ambas cuestiones de conclusiones sobre la eficacia de estos procesos a partir de diseños experimentales

inadecuados o incompletos subrayaba la necesidad de implementar las técnicas de estudio o crear nuevas técnicas experimentales para el estudio del deterioro térmico.

- **Análisis de las variaciones espaciales y temporales de temperaturas en muestras de cantera de materiales pétreos de construcción bajo regímenes de convección y regímenes de insolación simulados en el laboratorio.** La preeminencia del uso de sistemas de calentamiento por convección en el estudio del comportamiento térmico de los materiales pétreos hacía necesaria la confirmación de la influencia de los regímenes de calentamiento en la evolución térmica de los materiales pétreos, haciendo hincapié en la distribución de temperaturas tanto en su superficie como en perfiles de profundidad para evaluar el proceso de calentamiento por radiación frente al de convección y establecer la dinámica de evolución térmica en regímenes de radiación y su potencial como agente de deterioro.

- **Evaluación preliminar de la influencia que diferentes regímenes de calentamiento tienen en otros procesos de deterioro, como el causado por las sales, a través de experimentación en laboratorio.** Debido a que los ensayos habituales de deterioro de los materiales sitúan la temperatura como una condición de contorno sin atender al régimen de calentamiento era necesario establecer la influencia del tipo de calentamiento (convección o radiación) en la dinámica de procesos de deterioro tan comunes y frecuentemente ensayados como la cristalización de sales para establecer pautas para la mejora de las técnicas tradicionales de ensayo.

- **Estudio ambiental de los ciclos, estacionales, diarios y de corto rango, de temperatura en edificios propensos a sufrir deterioro térmico así como la relación de formas de deterioro en los edificios con su orientación y condiciones microclimatológicas para evaluar su posible origen condicionado por efectos térmicos.** El estudio de casos reales como complemento a los ensayos de laboratorio es crucial para evaluar la posible efectividad del deterioro térmico y el papel que juegan los cambios de temperatura en el deterioro de los materiales pétreos. Este estudio se llevó a cabo en situaciones propensas al deterioro térmico tanto como consecuencia de las características petrológicas concretas de un material, como por causa del diseño y situación de los materiales en un edificio.

- **Simulación en laboratorio de los aumentos repentinos de temperatura producidos en un fuego y evaluación de las variaciones fisicoquímicas que**

---

**producen en los materiales pétreos.** Con especial atención al uso de metodologías no aplicadas anteriormente a este tema en las que el calentamiento de los materiales se produjese por radiación, para así mejorar el acuerdo entre proceso real y proceso simulado en el laboratorio.

- **Estudio de las formas de deterioro y efectos producidos en casos de fuegos reales en edificios históricos.** Como complemento necesario al estudio de laboratorio se estudió el resultado final de fuegos reales en edificios históricos construidos con diversos materiales pétreos, poniendo especial atención en generar una clasificación que relacione formas de deterioro y litología.

- **Evaluación comparativa de los mecanismos de acción de la insolación y el fuego, sus similitudes y diferencias, así como su relación con los procesos de fatiga y choque térmico.**

### **3. Antecedentes históricos**

#### **3.1. La piedra natural y su deterioro.**

Los materiales pétreos utilizados en arquitectura constituyen un recurso de gran importancia económica dentro de la industria de las rocas y minerales industriales al ser uno de los que posee mayor valor económico por tonelada. En España, la importancia es aún mayor dado que es uno de los principales productores a nivel mundial. Sin embargo, aparte de su importancia económica en la industria de la construcción actual, se suma su valor como principal constituyente del patrimonio arquitectónico y monumental a lo largo de la historia.

Los materiales pétreos utilizados en arquitectura se designan usualmente con el término *piedra natural*, que incluye a cualquier material pétreo que, después de un proceso de elaboración, sea susceptible de ser utilizado como elemento constructivo conservando su composición, textura y características, sea cual sea su elaboración o acabado (Echevarría y García, 1996). El término *piedra natural* se desglosa en los de *piedra de cantería*, aplicado a los materiales pétreos usados normalmente sin pulimento como elementos estructurales de un edificio, y en el de *roca ornamental*, que corresponde a las litologías empleadas como elemento decorativo de revestimiento con acabado pulimentado. En esta tesis se trata específicamente sobre los procesos de deterioro térmico en piedra de cantería.

La piedra puede considerarse como el material de construcción más importante a lo largo de la historia de la arquitectura ya que la mayoría del Patrimonio Cultural inmueble contiene piedra si no está construido en su totalidad con este material. Especialmente los países de la cuenca mediterránea y en concreto España presentan una amplia tradición de construcción en piedra.

El uso de la piedra como material arquitectónico se remonta a la prehistoria, donde las construcciones megalítica son en algunas áreas el único resto que queda de la ocupación humana en aquella época. Aunque los primeros vestigios de arquitectura con piedra de cantería, se encuentran en la zona natufiense de Palestina y Siria, y en la frontera de Irán e Iraq, y datan de hace unos diez mil años (Herrera, 1996), los egipcios

fueron el primer pueblo en utilizar piedra en grandes cantidades para la construcción (Bromehead, 1945). Se estima que las pirámides contienen más de cinco millones de toneladas de piedra caliza (Ashurst y Dimes, 2004). Posteriormente, han sido muchos los pueblos que han usado la piedra como material noble de construcción para obras importantes: Obras civiles y religiosas que fueron construidas con la intención de perdurar eternamente. Grecia y Roma supuso un periodo de esplendor de la construcción en piedra. También la Edad Media, con la construcción de las grandes catedrales y el surgimiento de los primeros gremios de canteros. Hasta la irrupción del hormigón en el siglo XIX, la piedra ha sido el material de construcción más importante y noble, estando su explotación controlada, a menudo, por los más altos poderes de los estados.

Sin embargo, aunque siempre se percibió la piedra como un material “eterno”, es bien conocido que la piedra de construcción sufre multitud de procesos de deterioro. Como cualquier roca situada en condiciones diferentes a la de su génesis, los materiales pétreos situados en un edificio constituyen un sistema física y químicamente inestable, y por tanto susceptible de sufrir numerosos procesos de alteración debido a los agentes externos; ya que en contacto con la atmósfera los materiales rocosos tienden a un nuevo equilibrio. De tal manera, es fundamental la aportación de la Petrología al estudio y comprensión de los agentes y procesos de alteración y degradación de los materiales pétreos en un contexto arquitectónico. Por un lado, en el caso de materiales pétreos usados en el patrimonio histórico arquitectónico, el deterioro de estos elementos supone la pérdida de obras artísticas y bienes culturales. Por otro lado, el estudio previo de estos materiales permite acomodar sus usos a sus propiedades en las obras nuevas y así, prevenir pérdidas económicas a corto plazo.

El estudio de la degradación de los materiales pétreos en el patrimonio arquitectónico es un campo multidisciplinar, cuyo estudio se ha abordado desde diversas materias. A lo largo de toda la historia se encuentran referencias de observaciones sobre el deterioro de los monumentos construidos en piedra, así como medidas para la protección del patrimonio artístico arquitectónico. La Historia Natural de Cayo Plinio II incluye multitud de observaciones realizadas sobre monumentos en las que refiere su estado de conservación y su queja sobre la falta de medidas de protección. La Geología ha tenido, desde su establecimiento como cuerpo independiente de conocimiento, un papel

relevante en el estudio de la degradación de los monumentos construidos en piedra, así como en su restauración. Por ejemplo, el geólogo William Smith, formó parte de una comisión establecida en 1838 para seleccionar el material más adecuado para realizar los reemplazamientos necesarios para la restauración del palacio de Westminster en Londres que fue fuertemente dañado por un fuego en 1834 (Winchester, 2002).

Sin embargo, se puede considerar que los estudios sobre el deterioro de la piedra en arquitectura se comienza a desarrollar como una disciplina con concepto propio durante la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX. Esto se debe principalmente a dos razones: Hacia la segunda mitad del siglo XIX se consolidaron los primeros organismos públicos y normas legales para la protección del patrimonio (Poblador, 2001) y durante ese siglo también se desarrolló el interés por mejorar la selección de los materiales pétreos para obras nuevas. En esta época se produjo la entrada de nuevos tipos de piedra de construcción debido a las mejoras del transporte (Gómez-Heras y Fort, 2003; Varas et al., 2003; Gómez-Heras y Fort, 2004). De esta manera los arquitectos pasaron de aplicar los conocimientos cualitativos sobre el comportamiento de los materiales tradicionales (Cubas, 1886; Schaffer, 1932) a plantear selección de los materiales desde un punto de vista más amplio y cuantitativo. La preocupación desarrollada por la selección de los materiales y la conciencia de conservación del patrimonio en piedra por parte de las instituciones públicas abrió el camino para el desarrollo experimental de la disciplina del estudio del deterioro de los materiales pétreos en arquitectura.

Existen algunas referencias tempranas con respecto a ensayos experimentales sobre piedra de construcción desde principios del siglo XIX como es el caso de De Thury (1828) que realizó una revisión sobre el uso de ensayos de cristalización de sales como análogo de la acción de las heladas en la piedra de construcción. Sin embargo el desarrollo principal se da hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

La disciplina del estudio del deterioro de los materiales pétreos usados en arquitectura se ha ido desarrollando de manera directamente proporcional a la tasa de deterioro en los mismos. Durante el siglo XX la velocidad de deterioro de los materiales se ha incrementado de manera espectacular con respecto a la tasa de deterioro en siglos anteriores, debido especialmente al aumento de los niveles de polución ambiental que afectan enormemente a la piedra natural.



La disciplina del estudio del deterioro de los materiales pétreos aplicados a la construcción se fue desarrollando y a lo largo de la primera mitad del siglo XX aparecen los primeros textos monográficos sobre la piedra de construcción y su deterioro como los de Howe (1910) o quizás el más destacado de Schaffer (1932) que es uno de los primeros textos específicos sobre la meteorización de la piedra en arquitectura.

Los procesos de deterioro ocurridos en un edificio no difieren sustancialmente de aquellos que encontramos en una roca situada en un afloramiento aunque con algunas salvedades: primero la historia de esfuerzos heredados, que en el caso de un sillar o mampuesto situado en un edificio se incrementa, segundo y complementando a este primero, todo el cortejo de agentes de deterioro con origen antrópico en mayor o menor medida, que se suma a los agentes de meteorización del ambiente determinado.

Para el estudio de la alteración de los materiales pétreos se ha de partir de la observación de los agentes de deterioro que puede sufrir un material pétreo en el contexto arquitectónico y las formas a las que puede dar lugar. La correspondencia entre forma de deterioro y agente no es necesariamente biunívoca: un agente de deterioro puede dar lugar a diversas morfologías de deterioro y una misma forma puede estar causada por varios agentes de deterioro actuando aislada o conjuntamente.

No obstante, es preciso a menudo que ya sea por un interés de aplicación industrial como para el estudio experimental de la degradación de un material pétreo se deba intentar aislar un agente de manera experimental y así realizar una estimación de la durabilidad de determinada roca frente a un agente de deterioro concreto a partir de ensayos de laboratorio. La durabilidad de una roca es la medida de su capacidad de resistir la meteorización y mantener su tamaño, forma, propiedades mecánicas y aspecto estético originales en el tiempo (Bell, 1993; Shadmon, 1993). Algunos autores señalan, sin embargo, que la durabilidad es un término vago y ambiguo al que se le asignan definiciones que depende del campo del investigador (Turkington, 1996).

Existe una amplia variedad de agentes de meteorización que ejercen su influencia sobre los materiales de construcción. Muchos de estos agentes son comunes a los que afectan a los materiales rocosos en su contexto geológico natural, sin embargo, dado que existe una gran proporción del patrimonio arquitectónico situado en entorno urbano existen otros que son peculiares de este contexto. Generalmente la humedad, las sales solubles, la contaminación atmosférica y el biodeterioro se consideran los agentes más

importantes en el deterioro de la Piedra Natural en este contexto (Schaffer, 1932, Winkler, 1973; Amoroso y Fassina, 1983; Winkler, 1994; Mingarro, 1996; Price, 1996; Esbert et al., 1997).

La preeminencia de estos agentes produce en ocasiones una falta de estudios sobre la acción de otros agentes de deterioro en los materiales pétreos en la edificación. Uno de los agentes que no se suele considerar de manera individualizada en los estudios sobre el deterioro son los cambios de temperatura producidos tanto por los ciclos de calentamiento por acción solar, como por incendios.

Las formas de deterioro que se encuentran en los edificios son muy variadas y existen varias propuestas de sistematización tanto en nomenclatura como en clasificación (Commissione NORMAL, 1988; Ordaz y Esbert, 1990; Fitzner et al., 1995; Fitzner y Heinrichs, 2002; Alcalde y Villegas, 2003; Fitzner y Heinrichs, 2004; Vergès-Belmin, et al., 2004). Como se ha dicho antes, estas morfologías no tienen porqué estar debidas a un agente único y son frecuentemente el resultado de diversos agentes actuando de manera conjunta. Los agentes de deterioro actúan, de hecho, siempre en sinergia y hay multitud de mecanismos de retroalimentación en el proceso de deterioro. De aquí, una correcta aproximación al problema no pasa a través de culpar a un agente aislado de una forma. Como decían Cooke y Warren (1973) “Las formas de deterioro puede que no revelen los procesos que las produjeron”. De tal manera, ninguna investigación debe de estar enfocada en determinar una relación directa causa-efecto entre un agente y un proceso de deterioro. Sin embargo, hay formas de deterioro que clásicamente se han relacionado con las propiedades térmicas de un material.

Según el postulado del primer principio de la termodinámica todo cuerpo por encima del cero absoluto de temperatura posee una energía calorífica que contribuye a su energía interna según:

$$dU = dQ - dW$$

Donde U es la energía interna, Q es la energía calorífica y W el trabajo.

La temperatura es una propiedad externa que expresa la variación de energía interna al comunicar energía calorífica a un cuerpo. Ambos conceptos se relacionan de manera directamente proporcional. La transferencia de calor entre diferentes medios se produce por tres mecanismos principales: convección, radiación y conducción.

La radiación se define como la emisión o transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas con fotones asociados. La radiación no necesita ningún medio para la transferencia de calor, pudiendo ocurrir incluso en el vacío.

La transferencia de calor por convección ocurre cuando un fluido entra en contacto con una fase sólida a diferente temperatura, de tal manera que se genera una capa de transición entre el medio fluido y el medio sólido en la que existe una transición entre la temperatura de ambos cuerpos.

De manera análoga a la convección, la transmisión por conducción, se produce por el flujo de energía que se genera al entrar en contacto dos sólidos a diferente temperatura, siendo proporcional el flujo de calor a la diferencia de temperaturas entre ambos sólidos.

El tratamiento que usualmente se le da a la temperatura en los ensayos de durabilidad de los materiales pétreos, normalmente, se limita a establecer una temperatura ambiental (obtenida por transporte directo de masa, es decir, por convección) como condición de contorno para un experimento. Cuando el sistema de calentamiento del material ensayado es por convección se elimina la influencia de las propiedades físicas de la roca relacionadas con la absorción de una radiación electromagnética, como por ejemplo el albedo, o fracción de radiación incidente que es reflejada por una superficie (McGreevy, 1985), y otras como la conductividad térmica y la capacidad calorífica se atenúan dando lugar a que las diferencias entre las litologías se anulen (Warke y Smith, 1998).

El deterioro causado por la temperatura comprende dos procesos relacionados con el calentamiento por radiación de los materiales: la llamada “meteorización por insolación” y el deterioro producido por el fuego que se han hecho corresponder a dos modelos de meteorización inducida térmicamente: la fatiga térmica y el choque térmico (Ollier, 1969; Winkler 1975; Yatsu, 1988; Winkler, 1997). El estudio del primero es claramente el más difícil, debido a la lentitud con la que se producen los procesos de deterioro térmico en el rango de temperaturas ambientales, lo que no necesariamente ha de hacerse sinónimo a la existencia de fenómenos de fatiga. Esto hace que su ensayo en laboratorio sea más complicado.

### 3.2. La hipótesis de la *meteorización por insolación*.

El estudio del posible efecto que podría suponer el calentamiento solar en la degradación de los materiales pétreos también se remonta a finales del siglo XIX. Esta suposición se desarrolló como un concepto inicialmente geomorfológico, como la mayoría de conceptos del deterioro de piedra en edificación, considerando que determinadas formas del paisaje solo se explicaban mediante el calentamiento solar como agente meteorizador.

La hipótesis fue pronto trasladada al ámbito de las rocas utilizadas en arquitectura. En esta línea se situaban los trabajos de Julien en 1880 en los que cita la degradación diferencial de las fachadas del Palacio de Justicia de Nueva York con respecto a su orientación, o los de Buckley en 1898, así como algunas referencias en los trabajos de Walther sobre los desiertos de Egipto (Blackwelder, 1933).

El hecho de que la meteorización por insolación no haya podido modelizarse en laboratorio alcanzando unos resultados satisfactorios en un tiempo adecuado, ha conducido al desarrollo de diferentes teorías sobre este tema en ambas direcciones desde experimentos únicos, y la mayoría de ellas se han convertido, como lo describieron algunos autores, en ‘un dogma que esta solidamente aceptado’ (Blackwelder, 1933), ‘una cuestión de especulación’ (Cooke y Warren, 1973), o una ‘abstracción académica’ (Camuffo, 1998).

Esta hipótesis se tomó de forma axiomática considerándose como un hecho. Sin embargo, a pesar de la aparente seguridad con la que algunos autores establecían esta influencia, su determinación tenía poca o ninguna base experimental (Blackwelder, 1933). Algunos autores dentro de este primer periodo de desarrollo de la hipótesis de la meteorización por insolación, son conscientes de esta ausencia de estudios experimentales y en sus publicaciones dejan claro la falta de pruebas al respecto. Por ejemplo, Shaler (1869), comentando las estructuras concéntricas en rocas graníticas de Nueva Inglaterra, hace referencia, con las suficientes restricciones, de la “posible tendencia” a la formación de cortezas que supondría la expansión diferencial de la zona externa de las rocas con respecto a la interna a causa del calentamiento solar.

Hasta finales del siglo XIX esta hipótesis de la meteorización por insolación ganó popularidad en los círculos científicos. A este fenómeno contribuyeron mucho, desde 1890, los trabajos de Walther sobre los desiertos de Egipto en los que hace mención constante de este tipo de agente meteorizador (Blackwelder, 1933).

Desde principio del siglo XX se acepta universalmente la generalidad de la hipótesis de la meteorización por insolación pero siguieron existiendo numerosas controversias sobre sus mecanismos en tanto en cuanto a la importancia con respecto a otros factores o en las morfologías de deterioro que eran explicables por esta acción solar. Así la primera etapa de aceptación viene seguida por un periodo de fuertes críticas ante este mecanismo de deterioro. Barton (1916) realiza la primera crítica fuerte a los trabajos de Walther. En la misma línea se situaron otros autores entre los que destaca Blackwelder. La aceptación de la influencia de la insolación como agente agresivo para los materiales pétreos no fue generalizada, y con frecuencia se consideraba que la acción meteorizadora del agua intersticial era suficiente para explicar la degradación de las rocas. La acción del agua se tomaba como un concepto excluyente despreciándose el posible efecto que pudieran tener los cambios de temperatura en sí mismos. Los cambios de temperatura debidos a la acción solar no se consideraban suficientemente intensos para producir daños en las rocas y se establece la conclusión de que deben realizarse más comprobaciones experimentales de los argumentos a favor de esta teoría (Blackwelder, 1933). Estas críticas se extendieron también a los trabajos publicados en los que se citaban ejemplos de deterioro por insolación térmica en arquitectura. Este es el caso de las críticas del anteriormente citado Barton (1916), de McBain y Ferguson, y de H. Schneider, ambos en torno a 1933 (Blackwelder, 1933).

Griggs (1936) tiene una gran importancia en el desarrollo de esta cuestión pues es el primer autor que realiza estudios sistemáticos de calentamiento-enfriamiento de muestras de roca en una cámara experimental y que hace un seguimiento petrográfico de las alteraciones. En sus trabajos introduce la idea de combinar estos ensayos con humedad y de la posible importancia del factor de fatiga en este tipo de procesos, lo que abrió nuevas líneas de investigación en este campo. Los resultados, en principio negativos, obtenidos por Griggs (1936) y las críticas de Blackwelder (1933), llevaron al abandono de esta hipótesis por unos años (Ollier, 1984).

Durante los años sesenta se produce un resurgimiento del planteamiento de esta cuestión con los trabajos de Ollier y Tuddenham (1962) y Ollier (1963, 1965) sobre formas de deterioro en Australia causadas presumiblemente por meteorización por insolación. Por el contrario, Roth (1965) realiza un registro extensivo de temperaturas superficiales y a diferentes profundidades, concluyendo que los cambios térmicos no podrían deteriorar las rocas por si mismos.

Pero no es hasta la década de los setenta, cuando se comienzan a producir las principales contribuciones a la discusión sobre este fenómeno, esta vez desde un punto de vista experimental. Por un lado, Aires-Barros et al. (1975) retoman las consideraciones de Griggs (1936) y realizan simulaciones en cámara climática, combinando los estudios de calentamiento con los de inmersión en soluciones acuosas y cuantificando los efectos de fatiga en la degradación de los materiales. Por otra parte, se progresa en la recogida de medidas de campo de distribuciones de temperatura en el seno de las rocas. De esta manera se obtuvieron datos complementarios a los de la línea de investigación basada en diseños experimentales en laboratorio. Este es el caso de Peel (1974) que realiza medidas de las variaciones diurnas de temperaturas en superficie y con respecto a la profundidad en muestras situadas en campo, recalando las diferencias encontradas entre distintos materiales expuestos en el mismo ambiente. Otros autores, como Smith, subrayaron las variaciones estacionales en las medidas (Smith, 1977), así como las relaciones existentes entre orientación y regímenes térmicos de los materiales pétreos en los desiertos (Smith, 1978).

Rice (1976), reaviva el debate sobre las teorías “pasadas de moda” de la meteorización por insolación, considerando que, aunque la combinación de otros mecanismos pueda generar la rotura de una roca, la insolación puede ser un factor suficiente por si solo para el deterioro mecánico de los materiales pétreos. También reconoce como evidente que se necesitaban más evidencias experimentales para desechar esta teoría (Rice, 1977). Winkler (1977) añade a las consideraciones de Rice, la necesidad de complementar la acción de la insolación con la humedad de la roca, calificando la combinación de la insolación con la humedad como un “asunto muy caliente”. Desde este punto y a lo largo de las últimas décadas del siglo XX se promueven las principales cuestiones referentes a la meteorización por insolación que se tratan en esta tesis.

En los últimos años se han multiplicado los estudios de las distribuciones de temperatura en las rocas tanto en medios naturales (p.ej. Kerr et al., 1984; Jenkins y Smith, 1990; Halsey et al., 1998; Hall, 1999; Smith et al., 2000; Hall y André, 2001; Iñigo y Vicente-Tavera, 2002; Hall y André, 2003) como en condiciones de laboratorio (p.ej. McGreevy, 1985; Hall y Hall, 1991; Warke y Smith, 1994; Warke et al., 1996; Warke et al, 1998; Gómez-Heras y Fort, 2002; Turkington et al., 2002). Sin embargo, en todos estos casos, el estudio de la distribución de temperaturas en el seno de un material pétreo se ha circunscrito a la adquisición de una única temperatura de superficie y un conjunto muy limitado de temperaturas en puntos arbitrarios del interior del material.

Estos experimentos han constatado la importancia de considerar las diferentes condiciones microambientales que se pueden dar ante unas mismas condiciones meteorológicas como consecuencia de la variación de ciertas propiedades de la roca (Warke, 2000).

El albedo se ha reconocido como una de las propiedades más influyentes en la temperatura superficial (Kerr et al., 1984). Peel (1974) ya demostraba las diferencias de temperatura que existían entre rocas claras y oscuras. Posteriormente, otros autores han reconocido las diferencias en las temperaturas alcanzadas por diversos materiales pétreos como consecuencia de sus diferentes albedos (p.ej. McGreevy, 1985; Warke y Smith, 1994). Warke et al. (1996) cuantificaron las diferencias de temperatura que provocaba la variación artificial del albedo (debido al ensuciamiento de la roca) y como, con la utilización de cámaras climáticas que calentaran por convección, las diferencias entre las propiedades térmicas de distintas rocas podrían verse anuladas (Warke y Smith, 1998). Queda por resolver al inicio de esta tesis hasta que punto las diferencias de albedo pueden producir diferencias de temperatura a escala granular (Hall y André, 2003). La capacidad calorífica así como la conductividad térmica son otros factores que se han mencionado como influyentes en la temperatura de superficie (McGreevy, 1985; Jenkins y Smith, 1990; McGreevy et al., 2000). También el tamaño del material afectado por la insolación se ha considerado como una influencia, siendo la importancia de los efectos de la insolación proporcional al tamaño de la roca (Rice, 1976).

La escala en la que actúan los mecanismos de deterioro y los problemas de escala en la interpretación del deterioro térmico por insolación ha sido otro punto de desarrollo del conocimiento sobre la meteorización por insolación (Smith, 1996; Gómez-Heras et

al., 2004b). La frecuencia de los ciclos de calentamiento tiene una importancia considerable en la consideración de los efectos de fatiga mecánica que pudiera llevar asociada la insolación (Halsey et al., 1998). Las fluctuaciones de temperatura de corto periodo, debidas al viento o las nubes, se superponen a los ciclos diurnos (Jenkins y Smith, 1990; Bernardi y Vincenzi, 1993; Halsey et al., 1998; Hall y André, 2001) y pueden y las diferencias de temperatura entre granos minerales pueden tener mayor importancia en el control de los efectos de deterioro térmico (Hall y André, 2003). Sin embargo no existen estudios de laboratorio sobre la respuesta térmica de los materiales a estos ciclos de corto rango.

Dado que las rocas de bajo albedo alcanzan en regímenes de insolación temperaturas superiores a la temperatura ambiente y que en localizaciones concretas se han registrado variaciones diurnas de temperatura de hasta 54 °C (Cooke y Smalley, 1968), algunos autores han extrapolado estos datos y han utilizado altas temperaturas para acelerar el proceso de deterioro en ensayos de durabilidad frente a la meteorización por insolación (p.ej. Griggs, 1936; Cooke, 1981; Franzini et al., 1984; Siegesmund et al., 2000a; 2000b; Weiss et al., 2003; Weiss et al., 2004, Koch y Siegesmund, 2004). Esto ha dado lugar al uso de ciclos de temperatura como el “Wady Digla”, con temperaturas máximas de más de 70 °C y variaciones diurnas de unos 50 °C (Cooke, 1981). Estos regímenes no replican el fenómeno de la insolación, ya que los ensayos de deterioro por insolación no pueden acelerarse sin cambiar la naturaleza del fenómeno mismo.

La influencia que los cambios de temperatura pueden tener en otros agentes de deterioro ha sido también objeto de investigación en los últimos años. Específicamente la influencia que la insolación pudiera tener en el fenómeno de la cristalización de sales (Cooke y Smalley, 1968; Goudie y Viles, 1997; Halsey et al, 1998; Warke et al, 1998; Smith et al., 2005). Sin embargo, aunque se ha aceptado como una posibilidad teórica, los estudios que han simulado estos efectos han arrojado datos negativos (Goudie, 1974). No obstante no existen estudios experimentales sobre los distintos mecanismos de cristalización que se pueden dar lugar con diferentes regímenes experimentales de calentamiento.

Aunque queda fuera del alcance de esta tesis, es de destacar la línea de investigación referente al efecto que los cambios de temperatura en el rango medioambiental tiene en el deterioro de los materiales ornamentales utilizados como aplacados para el



revestimiento de obras nuevas; específicamente el combamamiento que se produce en las placas de mármol y su posible relación con las variaciones de temperatura (p.ej. Kessler, 1919; Franzini et al., 1984; Goudie y Viles, 2000; Siegesmund et al., 2000a; 2000b; Weiss et al., 2002; Zeisig et al., 2002; Malaga-Starzec, 2003; Weiss et al., 2003; Weiss et al., 2004, Koch y Siegesmund, 2004).

### **3.3. El deterioro causado por el fuego.**

Las variaciones de temperatura que produce un fuego son un caso particular en el cual los gradientes de temperatura que se alcanzan en el seno del material son suficientes para deteriorar en pocos minutos los materiales pétreos (Allison y Goudie, 1994). De esta forma, al contrario que en la hipótesis de la meteorización por insolación, ha existido un consenso sobre la efectividad del fuego en el deterioro de los materiales pétreos. Sin embargo, es sorprendente la relativa escasez de estudios en detalle sobre los efectos del fuego en la piedra natural.

Los fuegos forestales se han considerado clásicamente como un agente de meteorización de los materiales pétreos en medios naturales. Ya Blackwelder (1926) los mencionaba como un agente importante como causa de desplazados en rocas. Posteriormente, el fuego ha pasado a estudiarse como un factor de deterioro en materiales pétreos de edificación (p.ej. Winkler 1973; Ollier y Ash, 1983; Chakrabarti et al., 1996; Ehling y Kohler, 2000; Hajpál, 2002; Gómez-Heras et al., 2004c ).

Hasta los estudios microscópicos de Tarr (1915) sobre muestras quemadas, sólo se había llegado a una determinación cualitativa sobre como los granitos son “menos resistentes que las areniscas o calizas” (Tarr, 1915; p. 349) o que las rocas con mayor tamaño de grano son más sensibles que las de menor tamaño de grano.

De aquí se extrae que desde un primer momento se diferenciaron dos grupos con respecto al comportamiento de los materiales pétreos con respecto al fuego. Por un lado las rocas tenaces o competentes, como los granitos, donde los efectos principales del fuego se relacionan con la fisuración, y por otro lado los materiales sedimentarios, en los cuales no se observaban modificaciones estructurales importantes.

En un primer momento, la mayoría de estudios se ha centrado en la determinación del cambio de propiedades mecánicas en materiales densos tras un fuego y en la variación de color producida por la oxidación del hierro en los materiales sedimentarios (Ollier y Ash, 1983; Allison y Goudie, 1994; Chakrabarti et al., 1996).

No es hasta los últimos años en que se recogen las primeras observaciones sobre los cambios mineralógicos que se producen en los materiales pétreos por acción del fuego y las implicaciones que esto puede tener en el futuro comportamiento de los materiales frente al deterioro (Ehling y Kohler, 2000; Hajpál, 2002; Gómez-Heras et al., 2004c; Hajpál, 2004; Hajpál y Török, 2004).

Con respecto a los estudios experimentales, hasta la fecha se han realizado con hornos convencionales de laboratorio sobre muestras de varios centímetros cúbicos (p.ej. Goudie et al., 1992; Allison y Goudie, 1994; Chakrabarti et al., 1996; Hajpál, 2002, 2004; Hajpál y Török, 2004). Estos ensayos se realizaban sobre muestras a las que se les aplicaba una rampa de calentamiento, de tiempo variable desde unos minutos a horas, para luego someterlas a un proceso de choque térmico mediante su inmersión en agua (p.ej. Chakrabarti et al., 1996) o a un descenso gradual de temperatura (p.ej. Goudie et al., 1992; Hajpál, 2002).

El principal mecanismo de calentamiento de los materiales pétreos es la radiación (Ollier y Ash, 1983; Wickström, 2004). Este factor no se tiene en cuenta en un horno convencional, donde el calentamiento se obtiene por convección de tal manera que en este tipo de experimentos, “las condiciones de los experimentos no reflejan enteramente los procesos que tienen lugar durante un fuego natural” (Hajpál y Török, 2004).

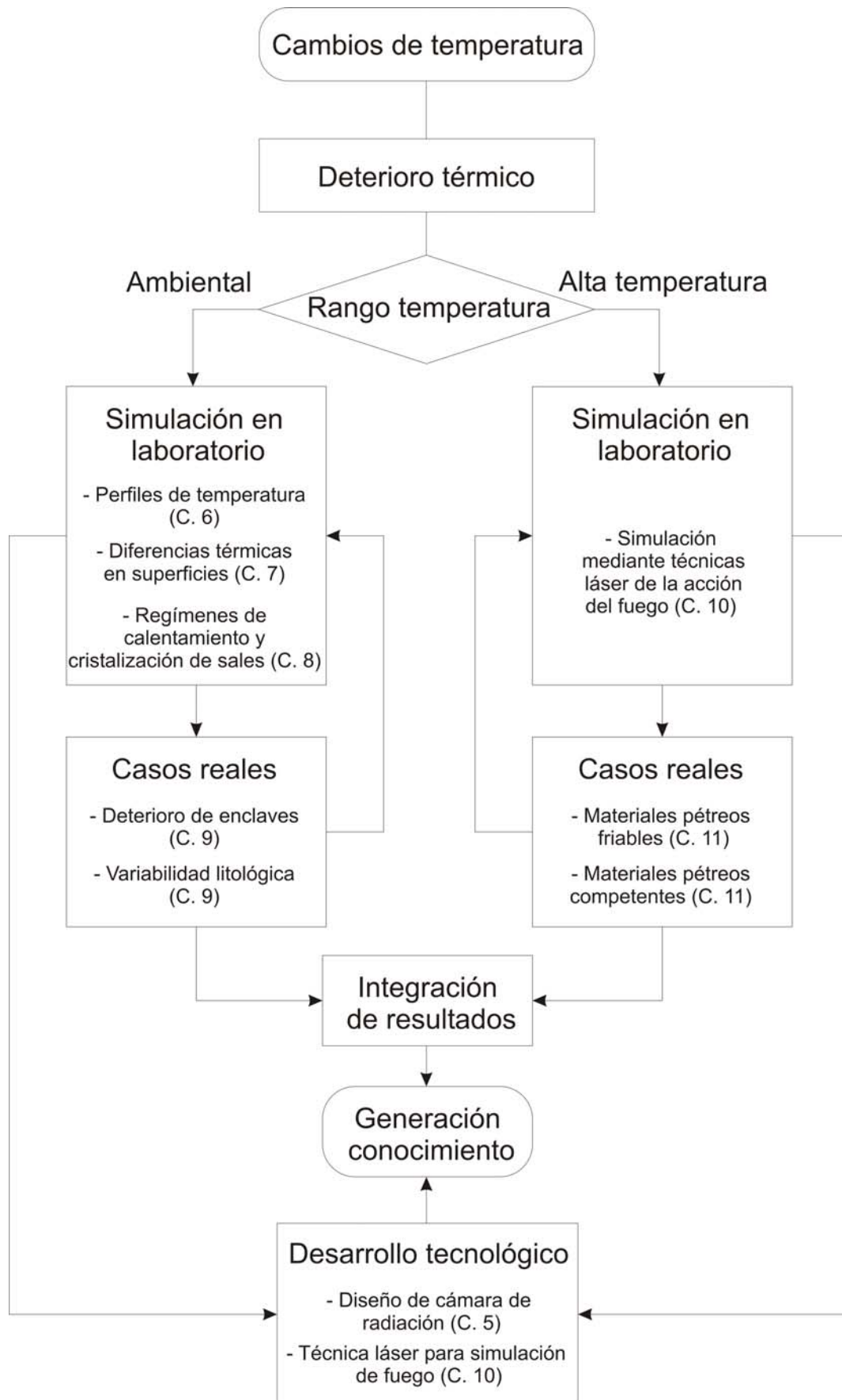
## **4. Metodología**

La variedad de objetivos de la presente tesis, que aborda procesos y situaciones de deterioro térmico tanto a alta temperatura (fuego) como a temperaturas ambientales (meteorización por insolación), condiciona la utilización de materiales y técnicas de estudio diferentes, dependiendo de los objetivos específicos en cada caso estudiado. Por ello, no resulta adecuada en este punto una simple descripción general de las técnicas y los materiales utilizados, siendo más clarificador presentar el entramado metodológico sobre el cual se ha realizado la investigación en esta tesis.

Así, este capítulo recoge las consideraciones metodológicas que estructuran el conjunto de la tesis y una enumeración de las técnicas y materiales utilizados en las diferentes secciones de la investigación llevada a cabo. Estos se expondrán más detalladamente en cada uno de los diferentes capítulos.

La figura 4.1 resume el diseño metodológico a partir del cual se ha desarrollado el plan de trabajo de esta tesis que parte desde el planteamiento de la efectividad de la temperatura como agente de deterioro para culminar en la generación de una serie de resultados científicos y tecnológicos. Esta tesis se concibió para estudiar diferentes procesos dentro de las dos grandes realidades del deterioro térmico, ganando así una mayor perspectiva de la complejidad de esta temática y desarrollando diferentes sub-líneas de experimentación dentro de este campo. Uno de los grandes objetivos conceptuales de la presente tesis ha sido que incluyese diferentes aspectos del proceso cognoscitivo de I+D+I, incluyendo la investigación en laboratorio, la evaluación y estudio de casos y la generación de resultados científicos y tecnológicos

Así, de los cambios de temperatura como agente de deterioro dimana el proceso de deterioro térmico que incluye dos grandes realidades diferenciadas: el deterioro térmico en el rango ambiental de temperaturas y el deterioro térmico a altas temperaturas. La investigación comprendió en ambos casos la simulación y estudio en laboratorio de algunos de estos procesos; y el análisis de casos reales, constituido por el estudio de edificios afectados por deterioro térmico.



**Figura 5.1:** Síntesis metodológica de esta tesis doctoral con indicación de los capítulos (C.).

El proceso de calentamiento por radiación a temperaturas ambientales se simuló en laboratorio y se estudió las diferencias existentes entre los regímenes de calentamiento por radiación y por convección. La distribución de temperaturas en la superficie y en el seno de los materiales se estudió para evaluar el potencial de los cambios térmicos producidos por la radiación solar como generador de dos tipos de formas de deterioro que son las principales causas de rotura y pérdida de masa en los materiales pétreos: los desplazados y la disgregación granular. La influencia de los regímenes de calentamiento en el proceso de cristalización de sales se evaluó como ejemplo de la sinergia de agentes de meteorización y las consecuencias que la anisotropía en la distribución de temperaturas en una roca puede tener en las técnicas de ensayo acelerado de materiales.

En el campo de las altas temperaturas se realizó mediante láser una simulación del calentamiento por radiación producido por el fuego y sus efectos de cambio químico-mineralógico y de microfisuración de los materiales pétreos.

La inexistencia o la falta de idoneidad de las técnicas experimentales existentes llevó a la necesidad de diseñar nuevas técnicas experimentales o adecuadas a los procesos estudiados. Esto condujo a la generación de un desarrollo tecnológico, expresado en nuevos aparatos o técnicas como puedan ser la cámara automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación o el uso de láser de infrarrojos para la modelización de fuegos a micro-escala. El desarrollo tecnológico, en este caso, se puede traducir en la generación de normativas de ensayo de materiales de interés industrial, y por tanto en una generación de conocimiento tanto tecnológico como normativo.

El estudio en el laboratorio se complementa y completa con el estudio de diferentes casos en monumentos en los que se evalúan la contribución de los procesos de deterioro térmico en la generación de determinadas patologías en los edificios. La integración de resultados obtenidos, tanto en los ensayos de laboratorio como en los estudios de casos reales de ambos procesos a temperaturas ambientales y altas, da lugar a un modelo general del deterioro térmico que redunda en la generación de conocimiento científico de base sobre este proceso en los materiales pétreos de construcción.

Con respecto a los materiales y técnicas analíticas utilizadas en esta tesis, las tablas 4.1 y 4.2 recogen de manera esquemática cuales se han utilizado en las diferentes secciones de la misma. Estas tablas dan una idea de la variedad de materiales y técnicas, que está condicionada por los objetivos específicos perseguidos para cada experimento.

**Tabla 4.1:** Variedades litológicas utilizadas en cada capítulo, con indicación de su nombre comercial.

	Temperatura ambiental				Fuego	
	C. 6	C. 7	C. 8	C. 9	C. 10	C. 11
<b>Rocas ígneas</b>						
Leucogranito (Mourne)		X				
Monzogranito (Guadarrama)	X	X		X		X
Granito porfírico (Rosavel)		X				
Diorita (Negro Ochavo)	X	X				
<b>Rocas sedimentarias calcáreas</b>						
Biomicro (Bateig)	X		X			
Biomicro (Colmenar)	X					
Biomicro (Calatorao)				X		
Pelmicro (Torrubia)				X		
Dolomía cristalina (Redueña)						X
<b>Rocas sedimentarias detríticas</b>						
Subarcosa (Villamayor)					X	X
Litoarenita (Uncastillo)					X	X

**Tabla 4.2:** Técnicas analíticas utilizadas, con indicación de los capítulos donde se han empleado.

	Temperatura ambiental				Fuego	
	C. 6	C. 7	C. 8	C. 9	C. 10	C. 11
<b>Técnicas microscópicas</b>						
Microscopía óptica de polarización	X	X	X	X	X	X
Microscopía electrónica de barrido			X	X	X	X
Microscopía de fluorescencia						X
<b>Técnicas de caracterización física</b>						
Espectrofotometría	X	X	X	X	X	X
Comportamiento hídrico	X	X	X		X	
Porosimetría de Intrusión de Mercurio	X		X	X	X	X
Velocidad de ultrasonidos	X		X			
Análisis de imagen						X
Rugosimetría					X	X
<b>Técnicas de caracterización químico-mineralógica</b>						
Difracción de rayos X					X	X
Espectroscopia de infrarrojos					X	X
Análisis químico					X	X
Termogravimetría					X	X
<b>Técnicas de monitorización ambiental</b>						
Termometría de infrarrojos	X	X		X	X	
Sensores térmicos de contacto	X	X		X		
Control de parámetros ambientales	X	X	X	X	X	
Ensayos de envejecimiento acelerado	X		X			

**DETERIORO TÉRMICO DE MATERIALES PÉTREOS  
EN EL RANGO AMBIENTAL DE TEMPERATURAS**





## **5. Diseño experimental de cámara para el estudio de los materiales en entornos de radiación**

Aunque insistiendo en el hecho de que la actuación individual de un agente de deterioro es una entelequia, no por ello se debe de obviar la experimentación teórica sobre un agente de deterioro aislado para entender mejor los procesos de meteorización y deterioro de los materiales pétreos que tienen lugar, tanto en los ambientes naturales como en el ámbito de la edificación. También, como se ha introducido anteriormente, se necesita predecir el comportamiento de un determinado material para su uso en arquitectura. Para ambas cosas se deben utilizar técnicas y metodologías que repliquen en el laboratorio de manera más o menos precisa la acción de determinado agente de deterioro sobre los materiales.

Estos estudios se suelen abordar en lo que se denominan de forma general *Cámaras de Envejecimiento*, en las cuales se simula la acción de uno o varios agentes de deterioro sobre las muestras para evaluar como evoluciona en cuanto a sus propiedades cuando es atacada por los agentes que hallamos incluido en el modelo experimental. La adecuación de estos dispositivos será mayor en tanto en cuanto cumplan fundamentalmente con dos requisitos:

- Control de parámetros ambientales
- Automatismo

El objetivo de este tipo de dispositivos es crear un modelo en el laboratorio del ambiente en el que la muestra está situada con respecto a uno o varios agentes, por lo que un requisito básico es la posibilidad de ejercer un control lo más preciso posible sobre las condiciones con las que estamos tratando la muestra. Este parámetro es también importante en tanto en cuanto se pretende que los ensayos realizados sean repetibles y estandarizados.

Debido a que en estos ensayos se experimenta sobre la acción repetida de los agentes de deterioro, desde un punto de vista de funcionamiento práctico es deseable que exista una automatización importante tanto en el funcionamiento de los dispositivos, como especialmente en la toma de registros de las condiciones ambientales u otros parámetros experimentales que se consideren de interés.

Hasta la fecha no existen equipamientos comerciales específicos para el estudio del comportamiento o evaluación del envejecimiento de los materiales de construcción en entornos de calentamiento por radiación. Para poder conocer las características térmicas de los materiales pétreos y su influencia en el deterioro de los mismos era necesario crear un nuevo equipamiento experimental que cumpliera las características expuestas anteriormente en cuanto a control ambiental y automatismo. Para ello se diseñó y construyó una cámara automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación que permite la caracterización del comportamiento térmico de los materiales mediante la simulación en laboratorio de condiciones ambientales de radiación.

Este prototipo se ha establecido para poder hacer ensayos de envejecimiento acelerado bajo condiciones más reales que las que se establecen en las normativas o recomendaciones vigentes y permitir realizar medidas en laboratorio, más acordes con la auténtica dinámica que produce la degradación por insolación. Aporta como ventajas fundamentales la posibilidad de realizar directamente con un PC, una toma de medidas continua y acoplada de distintos parámetros térmicos que nos permiten caracterizar el comportamiento de materiales de construcción ante este fenómeno.

Para ello, se han tenido en cuenta los prototipos anteriores referentes a estos ensayos y las aportaciones realizadas por los diversos autores que han abordado previamente este tema. Frente a los diseños anteriores se han realizado las mejoras necesarias para aproximarse a un mejor control de las condiciones ambientales de la cámara, y así obtener unos datos experimentales que sean más acordes a las condiciones reales de puesta en obra de los materiales. Especial atención se ha puesto a la generación de una tecnología con un grado de automatismo y autonomía elevados que permitiese un mayor aprovechamiento industrial del prototipo.

Más concretamente, el equipo diseñado modeliza las condiciones térmicas que sufre un elemento de obra colocado en fachada en el que incidan, como agentes de deterioro principales, la insolación y la lluvia. Los parámetros de medida que se obtienen son: la distribución de temperaturas con respecto a la profundidad en el seno de una muestra de material (lo que es reflejo de la conductividad térmica) y la dilatación térmica también a distintas profundidades de la muestra.

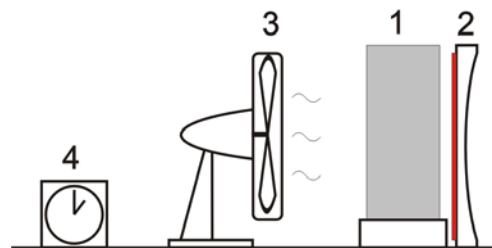
A partir de la identificación experimental en laboratorio del deterioro de la piedra de construcción se podría reconocer, de entre las patologías halladas en un edificio,

aquellas cuyo origen sea únicamente térmico. También permitiría, en el caso de patologías producidas por una combinación de efectos (temperatura – humedad; temperatura – presencia de sales), determinar en que proporción han influido las propiedades térmicas de los materiales de construcción. Dada además la ausencia de normalización al respecto de la medida y evaluación de la respuesta térmica de los materiales pétreos, este nuevo diseño experimental puede conducirnos a establecer patrones a la hora de caracterizar los materiales en cuanto a su durabilidad en condiciones de insolación.

Aunque su uso puede hacerse extensivo a otros materiales de construcción, como por ejemplo los cerámicos, el prototipo experimental que se ha creado está diseñado principalmente para el ensayo de “Piedra Natural”.

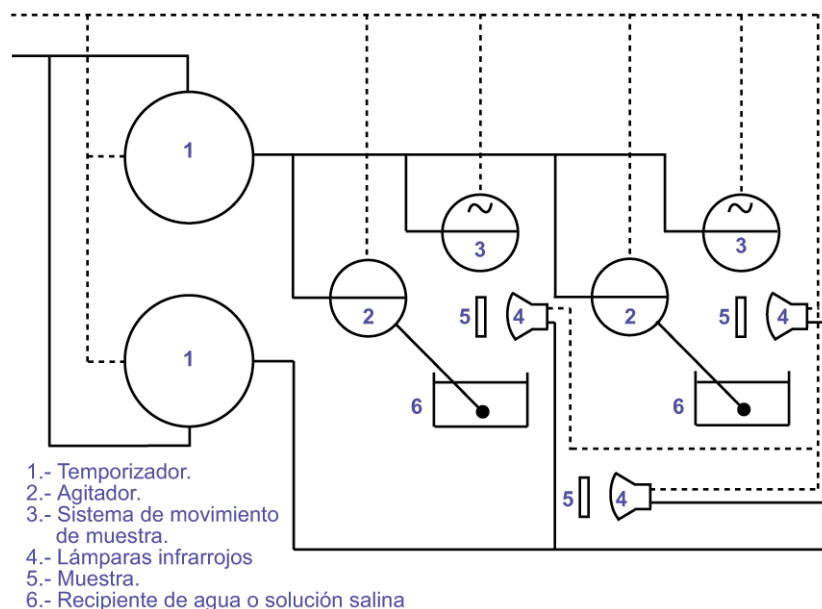
### 5.1. Antecedentes: Diseños anteriores

No existen muchas referencias a diseños experimentales anteriores al que se presenta en este trabajo. Los primeros ensayos de laboratorio que pretendieron establecer un modelo experimental para la valoración de la acción de la insolación en los materiales pétreos fueron los realizados por Griggs (1936) con un diseño experimental bastante rudimentario (figura 5.1) basado en la colocación de muestras irregulares (1) entre una placa calefactora (2) y un ventilador (3) controlados ambos por un reloj (4) que alternativamente encendía la placa y apagaba el ventilador y viceversa. Obviamente el control de las condiciones ambientales de este diseño era francamente precario.



**Figura 5.1:** Diseño experimental de Griggs (1936) para la modelización del deterioro por insolación.

Dejando de lado este diseño, el primero prototipo para el estudio de los materiales en entornos de radiación fue el ideado por Aires-Barros, Graça y Velez (1975), cuya esencia se basa en el modelo de Griggs (1936), aunque introduce mejoras bastante considerables en lo que se refiere a replicar en cierta medida las condiciones naturales de exposición de un material pétreo.



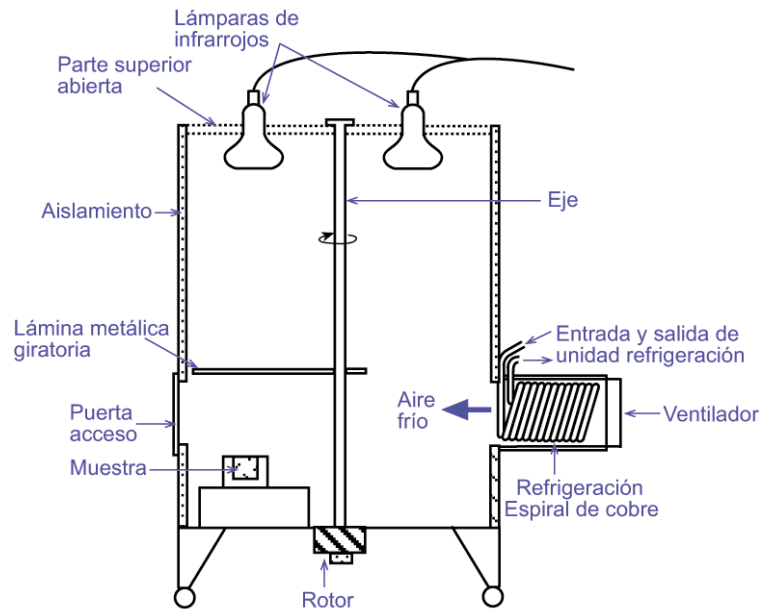
**Figura 5.2:** Diseño experimental para el estudio en laboratorio de deterioro por radiación (modificado de Aires-Barros et al., 1975)

El sistema consistía principalmente (figura 5.2) en unas lámparas de infrarrojos de 250 W frente a las que se situaba una serie de muestras circulares pulidas de 42 mm de diámetro y 8 mm de espesor ancladas mediante unos elementos móviles. Mediante este tipo de anclaje, controlado por un temporizador, las muestras podían ser sumergidas en soluciones salinas o de agua destilada. No existía ningún sistema de enfriamiento y el conjunto estaba controlado por dos termostatos. Se llegaron a acoplar hasta tres unidades experimentales (muestra y fuente de calentamiento).

Este prototipo no ofrecía ninguna medida de parámetros térmicos de las rocas pues el estudio de estos autores se centraba en la pérdida de peso de las muestras y en la observación de las modificaciones petrográficas de superficie.

El segundo de los diseños experimentales precedentes es el desarrollado por Warke y Smith (1994). Consistía en un tambor circular de 75 cm de diámetro y 1 metro de altura en cuya parte superior (figura 5.3) se situaban tres lámparas de infrarrojos. Mediante el

giro de una lámina metálica se conseguía crear ciclos de radiación y no-radiación sobre las muestras (bloques cúbicos de 50 mm de arista) situadas en la parte inferior aisladas excepto en la cara superior mediante poliestireno expandido. El interior del tambor se podía enfriar mediante una corriente de aire frío.



**Figura 5.3:** Diseño experimental para el estudio en laboratorio de la meteorización por insolación (modificado de Warke y Smith, 1994)

Con este diseño, los autores obtenían medidas de la temperatura de superficie y a 25 mm de profundidad mediante sondas térmicas recogiendo los datos mediante un data-logger de 12 bits.

## 5.2. Descripción del prototipo.

En la cámara de envejecimiento realizada en esta tesis se ha partido de la estructura de una estufa convencional que se encontraba inutilizada a causa de un incendio (figura 5.4). Se procedió al desmontaje de los elementos interiores, tanto mecánicos como eléctricos, así como del panel de instrumentación. La estructura metálica exterior se modificó forrandola con acero inoxidable de alta calidad y se creó una cámara aislante

rellena de fibra. Posteriormente, como se indica a continuación, se introdujeron los elementos eléctricos y de medida.



**Figura 5.4:** Aspecto inicial del armazón utilizado para la cámara de envejecimiento

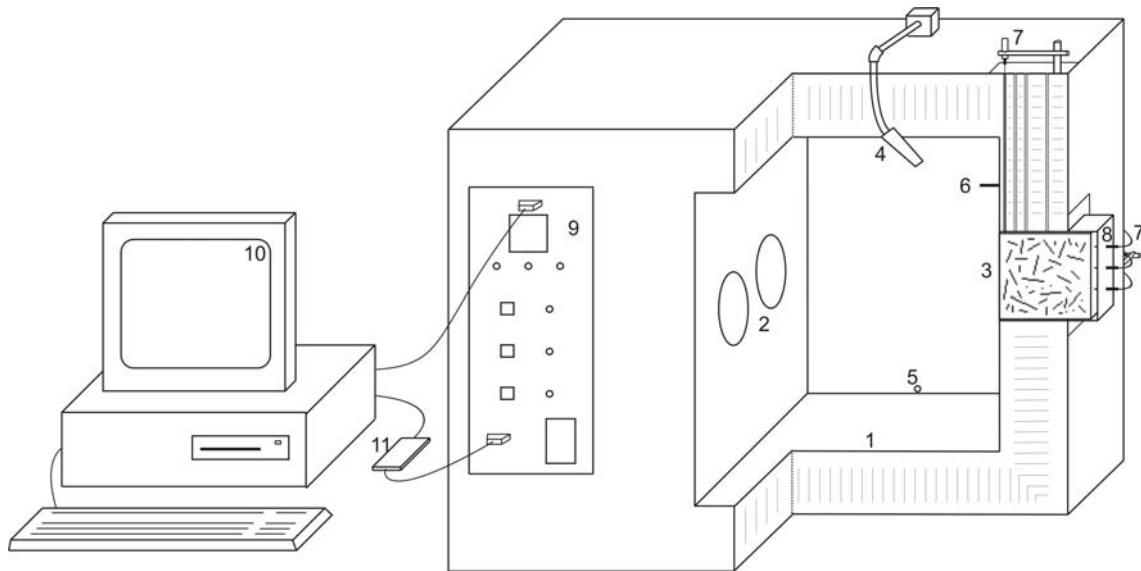
En la figura 5.5 se representa un dibujo esquemático de la cámara con una sección a un cuarto. Se ha eliminado la puerta situada en el frente de la cámara y realizado la sección para una mejor visualización de los elementos que constituyen la cámara. Como descripción general del equipo, en la cámara interior con aislamiento de fibra cerámica de baja masa térmica (1) se sitúan: unas fuentes

de radiación (2) en posición frontal a la muestra situada de forma vertical en un portamuestras (3). En el lado superior una fuente de irrigación controlada electrónicamente (4), y en posición inferior el sistema de desagüe (5). En el entorno de la muestra, una sonda controladora de la temperatura ambiente interior (6). En el exterior se sitúan: unos captadores de desplazamiento (7) y sondas térmicas de penetración (8) así como el panel (9) con los interruptores generales y las conexiones al PC (10). Al ser el control de la cámara computerizado se incluye un convertidor de señales analógicas (11), que se sitúa como un elemento externo al cuerpo de la cámara. Al final del capítulo se incluyen planos a escala de la planta, alzado y perfil del dispositivo, así como dos secciones del mismo.

### 5.2.1. Descripción de los elementos físicos de la cámara

La estructura de la cámara se divide en una carcasa exterior y una cámara interior. La carcasa exterior constituye el cuerpo de la cámara y esta dividida en dos partes. La primera de ellas, situada a la izquierda según se mira desde el frontal, es un espacio diáfano de 54 x 24 x 51 cm con una pared practicable. En esta zona se sitúan la conexión a la red, las conexiones al sistema informático y la mayoría de sistemas

eléctricos y electrónicos que forman la parte eléctrica de la cámara que se comentarán posteriormente. Se ha escogido esta ubicación para la parte eléctrica para que se encuentre aisladas de la zona de experimentación (donde se pueden llegar a alcanzar temperaturas altas) y por la importancia de una correcta ventilación para el funcionamiento del sistema eléctrico.



**Figura 5.5:** Esquema de la cámara automática seccionada para ver su interior. Los números hacen referencia al texto (modificado de Gómez-Heras y Fort González, 2002)

La cámara interior [1] (Los números entre corchetes hacen referencia a la figura 5.5) o cámara experimental propiamente dicha, se ha construido a partir de elementos de la antigua estufa. Para ello se realizó un recubrimiento con planchas de acero inoxidable, de 1.5 mm de espesor, para proteger la estructura de la cámara de la acción del agua. La cámara dispone de una bandeja inclinada, también de acero inoxidable, con un orificio de desagüe [5] para evacuar el residuo del rociado. En la cámara interior se sitúan los elementos principales del diseño experimental.

El espacio situado entre la carcasa exterior y la cámara interior se relleno con fibra cerámica de baja masa térmica para aislar, fundamentalmente con respecto a la temperatura, la cámara experimental del exterior y de la zona eléctrica.

La fuente de calentamiento de las muestras a ensayar consiste en dos lámparas de infrarrojos [2] de 150 W. El uso de una fuente radiante como sistema de calentamiento es uno de los puntos fundamentales de este diseño experimental pues ya se comentaba

en la introducción, que el calentamiento indirecto elimina las diferencias entre la temperatura que alcanzan las diferentes litologías y por tanto conduce a interpretaciones erróneas sobre los procesos de deterioro térmico.

En posición frontal se sitúa la muestra [3]. Las muestras son de mayor tamaño que las que se han utilizado en los prototipos anteriores de otros autores dado que la importancia de los efectos de la insolación aumenta proporcionalmente a su tamaño (Rice, 1976). Las muestras que se ensayan en la cámara tienen una sección de doce por doce centímetros y se pueden utilizar distintos espesores hasta un máximo de diez centímetros. De esta manera se pueden ensayar, tanto muestras de revestimientos (fundamentalmente rocas ornamentales para construcción nueva) como de bloques (que sirven como modelo de sillares de obras clásicas de cantería). La muestra se coloca con la cara expuesta a la radiación de manera vertical como en el prototipo de Aires-Barros et al (1975), puesto que la disposición en vertical es más acorde a la de los materiales en fachada. Sin embargo, por la misma razón, se limita a una cara el área expuesta como en McGreevy (1985) y Warke et al. (1996).

El dispositivo incluye la opción de combinar la acción de la insolación con la del agua. Hasta el momento esto se había realizado sumergiendo las muestras en soluciones acuosas (Aires-Barros et al, 1975), sin embargo en nuestro caso se realiza mediante rociado automático con spray [4] pues así se humedece la muestra de manera más acorde con las condiciones de lluvia a las que se ven afectados los edificios. El sistema de rociado se compone de una pieza metálica de las usadas en sistemas de riego con una boquilla que permite ajustar el caudal del chorro y su presión. El flujo de agua está gobernado por una electro-válvula situada en el exterior superior de la cámara. El agua procede de un depósito externo en el que se puede añadir agua destilada como con unas características de pH determinadas que nos permitan modelizar una lluvia ácida.

El dispositivo experimental puede programarse con ciclos complejos de evolución de la temperatura interior de hasta 126 segmentos, lo que permite modelizar las fluctuaciones de radiación de periodo corto (Jenkins & Smith, 1990) que hasta ahora no habían sido ensayadas experimentalmente. La recogida de datos de la temperatura interior se lleva a cabo mediante una sonda térmica de temperatura ambiental de tipo PT-100 [6].





**Figura 5.6:** Cámara automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación

Una de las aportaciones más novedosas del diseño es la integración de la medida de datos de temperatura a distintas profundidades de la muestra con los de dilatación en dos dimensiones. La medida de la dilatación de una muestra de roca en una cámara experimental de este tipo es totalmente inédita.

Para medir las dilataciones se ha recurrido a unos transductores de desplazamiento [7] de tipo LVDT (Transformador diferencial linealmente variable). Existen cinco posiciones en cada una de las dos dimensiones para situar los LVDT, de manera que se pueden tomar los datos de dilatación a profundidades de 2, 15 y 30 mm con respecto de la superficie calentada para el ensayo de una placa de 3 cm y dos medidas adicionales a 45 y 90 mm si se ensayan bloques de 12 x 12 x 10 cm. Los transductores se sitúan en la parte exterior, sujetos por un brazo metálico móvil y conectan a la piedra mediante varillas de cuarzo de 4 mm de diámetro. Para situar las varillas de cuarzo se han dispuesto cinco tubos de cobre que, a través del espacio aislado entre la carcasa exterior

y la cámara interior, permiten introducir las varillas de cuarzo para poner en contacto el transductor con la muestra.

La medida de la distribución de temperaturas en la superficie calentada como en el interior de la muestra se realiza mediante sondas de superficie y penetración [8] conectadas a un data-logger independiente. Para introducir las sondas de penetración se debe perforar la piedra a la profundidad deseada. La sonda de superficie se introduce en la cámara experimental mediante un orificio destinado al efecto. Las sondas de penetración salen al exterior por una pequeña puerta construida en la zona posterior del portamuestras. Mediante la puerta la zona posterior de la muestra se encuentra a la temperatura ambiente del laboratorio. De esta manera se provoca en la roca ensayada un contraste de temperaturas similar al que puede sufrir un muro, expuesto en una de las caras y a temperatura ambiente en la otra.

Finalmente, se han sustituido los elementos de control que en prototipos anteriores eran mecánicos por una serie de sistemas electrónicos que permiten que, una vez iniciado, el control del proceso de medición sea automático. En la parte frontal [9], se encuentran los controles generales de la cámara y las conexiones al ordenador desde el cual se puede seguir el proceso de medición y tratar los datos obtenidos.

### **5.2.2. Descripción de los elementos eléctricos de la cámara**

La figura 5.7 muestra el esquema eléctrico de la cámara. En la representación de los componentes eléctricos se ha intentado seguir, en la medida de lo posible, la norma EN 60617 de representación de esquemas eléctricos.

La alimentación de la cámara se realiza mediante conexión trifásica de corriente alterna a 220 V con toma de tierra. Las conexiones generales se encuentran en la parte posterior del panel frontal de control como un conjunto de terminales (bornas de conexión) montadas sobre un carril DIN simétrico estándar.

En el esquema se pueden seguir tres circuitos principales: dos de ellos corresponden al sistema de programación y calentamiento y el otro alimenta el dispositivo de medida de la dilatación.

El registro de las temperaturas de la piedra constituye un módulo independiente y externo por lo que no está representado en el esquema eléctrico y se comenta en un apartado propio.

#### · Elementos comunes en el panel de control:

El panel frontal de control que se puede observar en el alzado del plano 2 del anexo al final del capítulo, esta realizado con una chapa de acero, sustituyendo la que albergaba los mandos de la antigua estufa y contempla los siguientes elementos visibles empotrados:

- Un interruptor magnetotérmico Hager MC203A de 3 A que sirve de interruptor general del sistema y como protección en caso de sobrecargas. Aparte del interruptor magnetotérmico, existen cinco fusibles en cápsula de vidrio de 1 A. como sistema de protección adicional de los siguientes equipos:

Los dos fusibles situados en la parte superior protegen: el de la izquierda al controlador de procesos y el de la derecha al relé de estado sólido.

Los tres fusibles situados en línea vertical enfrentados a los interruptores protegen (de arriba abajo), a las dos lámparas y a la fuente de alimentación de transductores de desplazamiento.

- Tres interruptores bipolares T125 16(4)A 250V. Los dos superiores cortan el circuito de las lámparas y el inferior el de la fuente de alimentación.

- Un potenciómetro CEBEK I-14/15 para regular la intensidad de ambas lámparas en paralelo.

- Cuatro salidas donde se recoge la medida de los transductores de desplazamiento como diferencia de potencial en corriente continua



- Un controlador de procesos programable CAL 9500P empotrable de dimensiones 51 x 51 mm (incluyendo arandela exterior). Este controlador tiene en uso una salida analógica de evento que controla la electro-válvula del circuito de agua y una salida a relé de estado sólido para el control de las lámparas infrarrojas. Puede ser programado tanto desde el panel como desde el PC y tiene una memoria de 351 bytes que permite almacenar hasta 31 programas sencillos (dos rampas y un segmento de mantenimiento) o hasta un programa complejo de hasta 126 segmentos.

- Una salida de tipo RS 232 para conectar a un puerto COM del ordenador. Esta salida corresponde al controlador de procesos.

#### · Sistema de programación y calentamiento:

Aparte de los elementos situados en el panel de control, que han sido descritos en el punto anterior, fuera de la parte visible del panel frontal, en su parte posterior se encuentra un rele de estado sólido (SSR) de excitación continua Carlo Gavazzi RA4425-D08. Un relé de estado sólido es un dispositivo de conmutación basado en semiconductores que finaliza o interrumpe de manera eléctrica un circuito sin utilizar partes móviles. En este caso se interrumpe el circuito de la fuente de calentamiento mediante las señales del controlador de procesos.

Otros componentes de este sistema que constituyen elementos internos no situados en el panel frontal son una sonda para medir la temperatura del interior de la cámara y una electro-válvula para controlar el circuito de agua.

La sonda de temperatura ambiente es un termómetro de resistencia de platino PT100 de 3 hilos, que mide la temperatura por variación de resistencia eléctrica. Está conectada directamente al controlador de procesos que establece los ciclos de temperatura.

La electro-válvula que controla el flujo del agua de rociado está conectada a una salida de evento del controlador.

### · Sistema de medida de la dilatación:

Los componentes que forman parte del circuito de medida de la dilatación, se sitúan todos fuera del panel de control a excepción de las hembrillas de lectura en la parte inferior izquierda del panel. Se incluyen los siguientes equipos:

Fuente de alimentación EMS D519 De 165 x 102 x 41 mm con entrada a 220-230 V de corriente alterna. y salida a  $\pm 15$  V de corriente continua.

Tarjeta Eurocard de circuito impreso, amplificadora y acondicionadora de señal (CAH) de dos canales para LVDT. Sus dimensiones son 160 x 100 x 18 mm y las conexiones se realizan mediante un conector DIN 41612 para corriente alterna. La función básica de la tarjeta es activar los transductores que miden la dilatación con corriente alterna, tomar la salida de los transductores y convertirla a un voltaje de salida en corriente continua proporcional a la dilatación térmica. Se alimenta con una tensión de  $\pm 15$  V en corriente continua mediante la fuente de alimentación anterior.

Para la medida de las variaciones de magnitud en la muestra durante los ciclos experimentales se han instalado dos transductores de desplazamiento de tipo LVDT (Transformador diferencial linealmente variable) en miniatura, de tipo SM3 con excitación en corriente alterna. y recorrido  $\pm 3$  mm.

Este tipo de dispositivo (figura 5.8) se basa en la fuerza electro-motriz (fem) que induce una corriente alterna en un circuito próximo según la ley de Faraday:

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Donde  $\Phi$  es el flujo eléctrico y t es el tiempo

El dispositivo consta de una bobina alimentada con corriente alterna (bobina del primario) en cuyo seno se sitúa un núcleo magnético. Este sistema actúa como un transformador monofásico con núcleo móvil, generando una corriente eléctrica con una tensión ( $V_s$ ):

$$V_s = -N_s \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

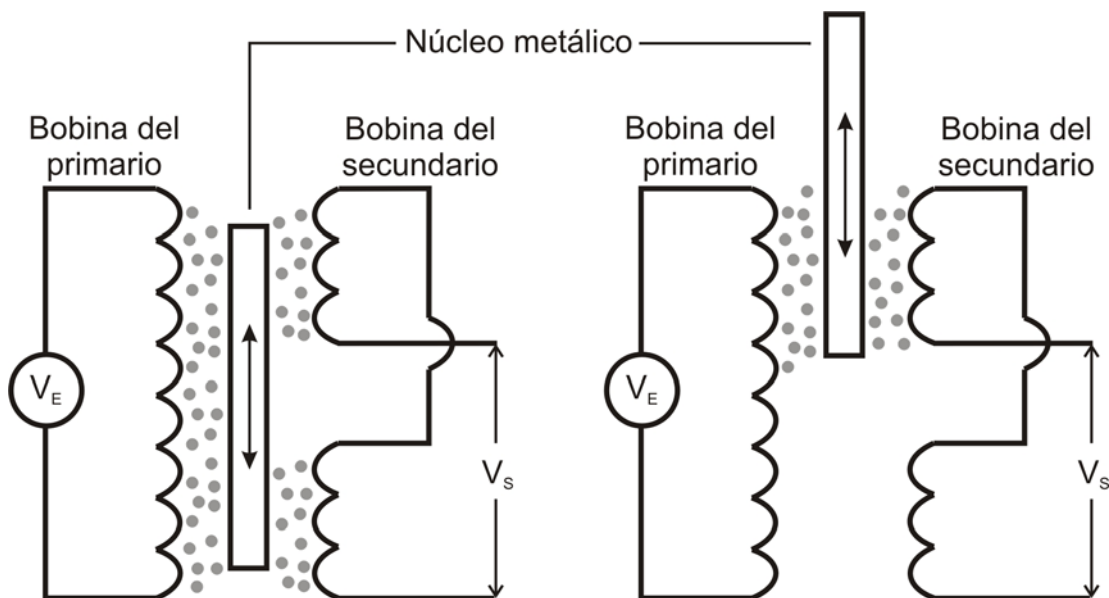
Donde  $N_S$  es el número de vueltas de la bobina de salida. Cuando el núcleo metálico se desliza a lo largo del transformador afecta a un número determinado de vueltas de la bobina generando un voltaje de salida determinado. Dado que el voltaje de entrada va a responder a la expresión:

$$V_E = -N_E \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

La relación entre el voltaje de entrada y salida será:

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{N_S}{N_E}$$

y dado que la tensión de la fem de entrada ( $V_E$ ) es conocido, la tensión de salida ( $V_S$ ) solo depende de la posición del núcleo y por tanto es proporcional al desplazamiento.



**Figura 5.8:** Esquema eléctrico de un transformador diferencial linealmente variable (LVDT)

La señal de salida que emiten estos transductores es una fem en corriente alterna que mediante la tarjeta CAH se convierte en una señal analógica de mV en corriente continua. Esta lectura en mV mediante un factor de conversión especificado en el transductor se traduce en un valor de desplazamiento en mm que es, por tanto, la dilatación que experimenta la muestra. La conducción a las bornas se ha realizado con cable apantallado para minimizar el ruido eléctrico.

Para que estos datos puedan ser leídos y procesados por el PC, permitiendo la toma de medidas y el control continuo, deben estar expresados en forma digital. Para ello se ha de usar un ADC (Convertidor de analógico a digital) que se sitúa en posición externa a la cámara (v. figura 5.5, nº 11).

Un convertidor analógico-digital toma un voltaje de entrada analógico y después de cierto tiempo produce un código con salida digital que representa a la entrada analógica con una precisión y resolución determinada. Existen muchos tipos de convertidores dependiendo del voltaje de entrada admitido, de la frecuencia de muestreo y del modo en el que se realiza la conversión. En este caso se ha utilizado un modelo prefabricado *pico* ADC-16 de alta resolución de 8 canales y 16 bits, con margen de entrada hasta 2,5 V y conexión al PC D9 para puerto COM.

#### · Sistemas externos:

Como se ha comentado antes, el circuito de registro de las temperaturas de la piedra constituye un módulo independiente y externo. Las medidas se hacen con un data-logger 8-bit Grant Instrument Squirrel con 8 sondas de penetración (bead thermistors) con tamaño de cabezal de 2 mm y un termómetro de infrarrojos *Raytek Raynger MX4* para las medidas de superficie. Los datos del data-logger son recogidos por este equipo y luego son volcados a la unidad informática, mientras que las medidas de temperatura de superficie son recogidas por el ordenador en tiempo real.

El ordenador desde el cual se realizan las mediciones y el control de la programación es un *Pentium* 133 MHz con sistema operativo instalado Microsoft Windows 98 (Segunda edición) en el que se ha aumentado la memoria RAM hasta un total de 64 Mb. Se ha habilitado el ratón en un puerto USB para dejar libres los puertos COM1 y COM2 para el registro de medidas, ya que el equipo no disponía de puerto PS/2. Para la recogida y tratamiento de las medidas se ha instalado el software necesario incluido con cada equipo (Raytek Software, PicoLog y CAL COMMS Software).



### 5.3. Control del instrumento y programación

Como se ha comentado antes, el sistema permite realizar programas complejos basados en la temperatura ambiente del interior de la cámara. Incluye la posibilidad tanto de realizar un ensayo sencillo como de funcionar de manera cíclica y de incluir el rociado de agua en cualquier segmento del ciclo. A partir de estas variables se puede diseñar un ciclo forzado, con condiciones extremas, que sería adecuado para realizar ensayos de envejecimiento acelerado. También se puede optar por modelizar distintas condiciones ambientales cálidas reales dependiendo del entorno en el que se sitúa o va a situar el tipo de material ensayado.

No se ha incluido ningún sistema de enfriamiento para evitar que en los ensayos pudiera influir el calentamiento o enfriamiento por corrientes de aire. La adición de un sistema auxiliar para disminuir la temperatura, a partir de aire frío, produciría corrientes en el interior de la cámara experimental de difícil predicción. Según esto se ha considerado que resultaría más beneficioso eliminar el enfriamiento forzado y dejar que el enfriamiento sea libre. Al dejarse enfriar libremente el sistema se impone una limitación en la velocidad de enfriamiento que se debe establecer en los ciclos climáticos. La velocidad máxima de enfriamiento viene condicionada por la inercia térmica del dispositivo. Aunque los valores a bajas temperaturas pueden mostrar cierta dispersión, el carácter estadístico que tiene un ensayo cíclico y el hecho de que los valores obtenidos de dilatación y distribución de temperaturas van a estar siempre referenciados al valor exacto de temperatura en la cámara en el momento de su medición hace que estas pequeñas variaciones se puedan despreciar.

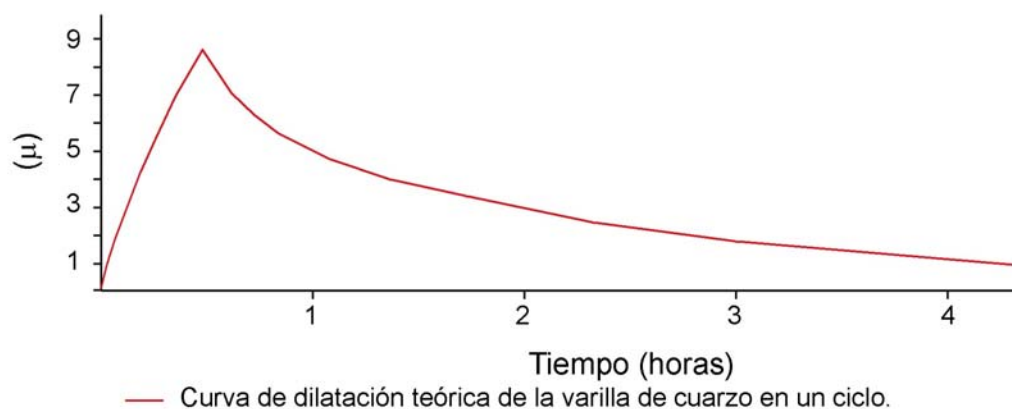
Esta velocidad de enfriamiento libre es la que se establece por defecto en cualquier ciclo experimental que se aborde y como se discutirá a continuación comparándolo con un caso de evolución de la temperatura ambiente en un medio real no supone ninguna limitación a la hora de establecer ciclos experimentales.

Mediante el potenciómetro se puede modificar la intensidad de la radiación de tal manera que tenemos dos posibles situaciones al definir el funcionamiento de la fuente de radiación durante la rampa de subida. La primera correspondería a la selección de una potencia alta de la fuente; así lograríamos que la radiación tuviera una intermitencia

más o menos acusada. Esta situación sería la idónea para ensayar el comportamiento de la muestra con respecto a las fluctuaciones de radiación de periodo corto que han sido descritas por algunos autores (Jenkins & Smith, 1990). La segunda opción correspondería a disminuir la potencia de infrarrojos hasta que tuviéramos la rampa de subida deseada con una fuente de radiación constante.

#### 5.4. Puesta a cero y calibrado del instrumento

Los captadores de desplazamiento para la medida de la dilatación de las muestras se encuentran en un entorno aislado con respecto al interior de la cámara. Sin embargo, existe un cierto grado de transferencia de calor que hace necesario un experimento de puesta a cero para eliminar, de los valores de dilatación obtenidos en los ensayos definitivos, los que corresponden a las varillas de cuarzo utilizadas como captadores del sistema LVDT, así como los de la propia cámara.



**Figura 5.9:** Dilatación teórica de una varilla de 12,01 cm para un ciclo experimental de calentamiento enfriamiento entre 26,5 y 37 °C.

Para realizar la puesta a cero se realizaron unos ensayos previos con las mismas condiciones a las que se iba a someter a las muestras posteriormente, incluyendo la presencia de la muestra en el portamuestras. Durante estos ensayos se mantienen

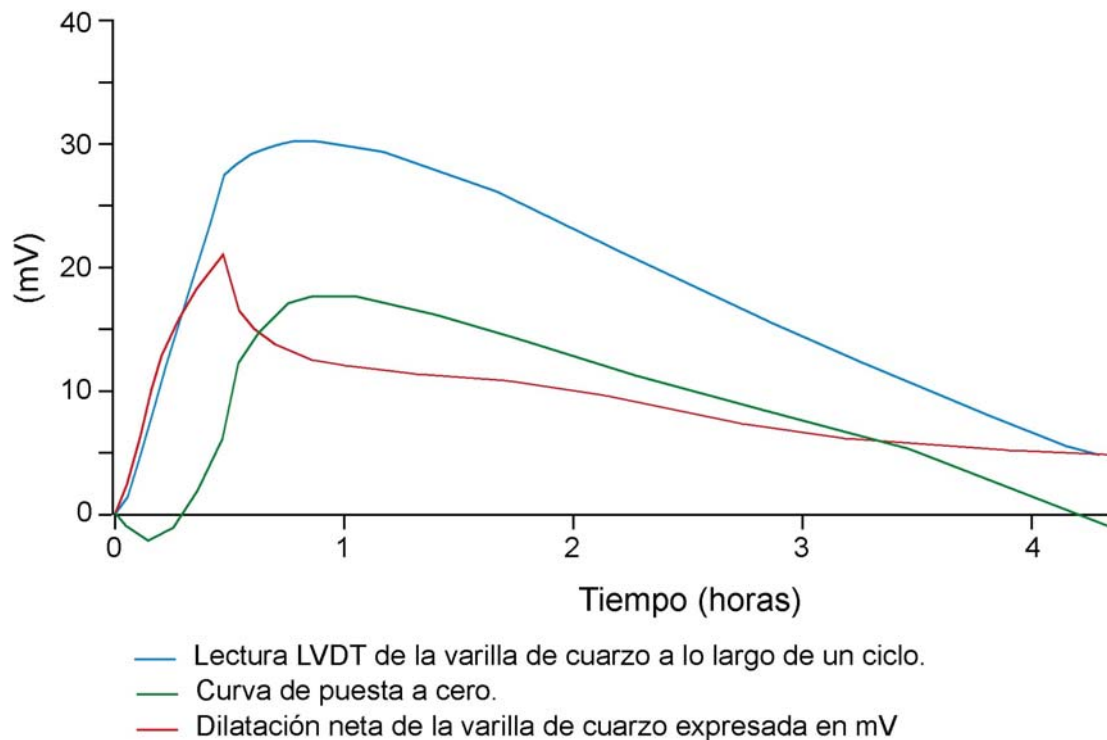
cancelados, mediante un film adhesivo removible, los orificios que posibilitan el contacto de los transductores con la muestra. De esta manera en el ordenador se registra una curva de diferencias de potencial en mV que habrán de ser restadas en el momento del ensayo definitivo.

Los datos de dilatación que se leen en el ordenador como mV se transforman directamente en valores de desplazamiento mediante un factor de conversión dado el carácter lineal del dispositivo LVDT.

Cada dispositivo LVDT tiene un valor nominal de sensibilidad que, en el usado en las pruebas preliminares es de 131.759 mV/V/mm a 5 KHz. Sin embargo es conveniente realizar una calibración específica. Para ello se ha de usar una muestra con un coeficiente de dilatación conocido, de tal manera que se pueda relacionar los valores de tensión con los de desplazamiento. En este caso se utilizaron varillas cilíndricas de cuarzo, de 4 mm de diámetro, con el eje c según la dirección de alargamiento, cuyo coeficiente de expansión térmica es conocido ( $\alpha = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  en el rango de temperatura de la experimentación (Hodgman, 1961)). En este experimento, determinado como patrón, se comparó el registro del ordenador con la dilatación teórica que la varilla de cuarzo de 12,01 cm experimentaría a lo largo de un ciclo ambiental. La figura 5.9 muestra la curva de dilatación teórica de la varilla para un ciclo experimental de calentamiento enfriamiento con un rango de temperaturas entre 26,5 y 37 °C.

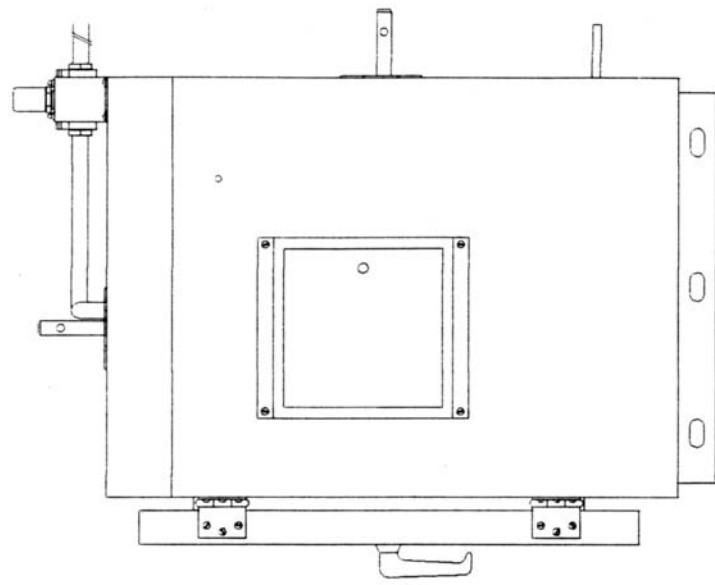
La figura 5.10 presenta los valores de tensión eléctrica en los LVDT que se obtuvieron en el ensayo de puesta a cero y en el ensayo real de esa varilla, así como la curva resultante de sustraer la puesta a cero a los valores obtenidos directamente del ensayo.

El ajuste entre la curva teórica y la obtenida durante el ensayo es muy alto. Para el valor utilizado de 0,05 V, la dilatación máxima medida con el aparato es de 8,05  $\mu\text{m}$  frente a las 8,57  $\mu\text{m}$  obtenidas a partir de los cálculos teóricos. Esto nos permite afinar la relación entre los valores de tensión eléctrica y dilatación térmica para el dispositivo. Este proceso de puesta a cero es conveniente realizarlo en cada caso concreto, pero del resultado obtenido podemos concluir que la metodología utilizada para la puesta a cero es correcta.

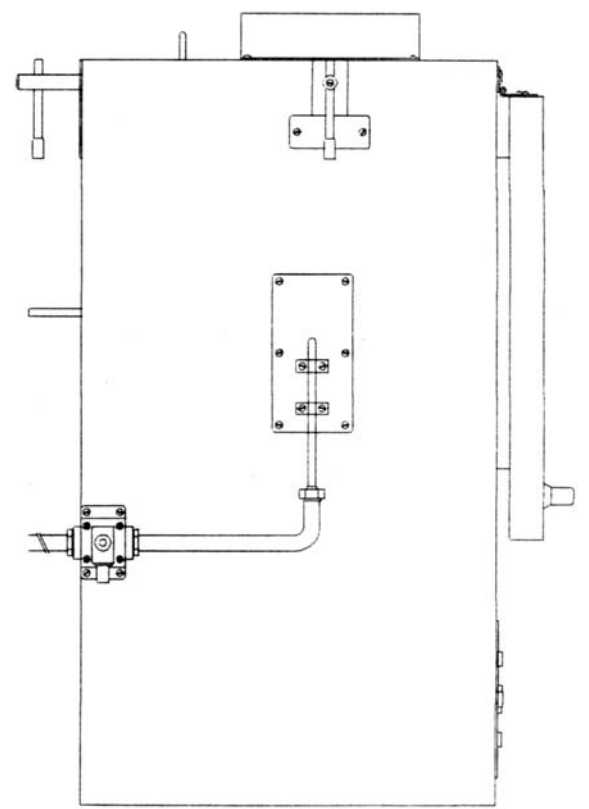
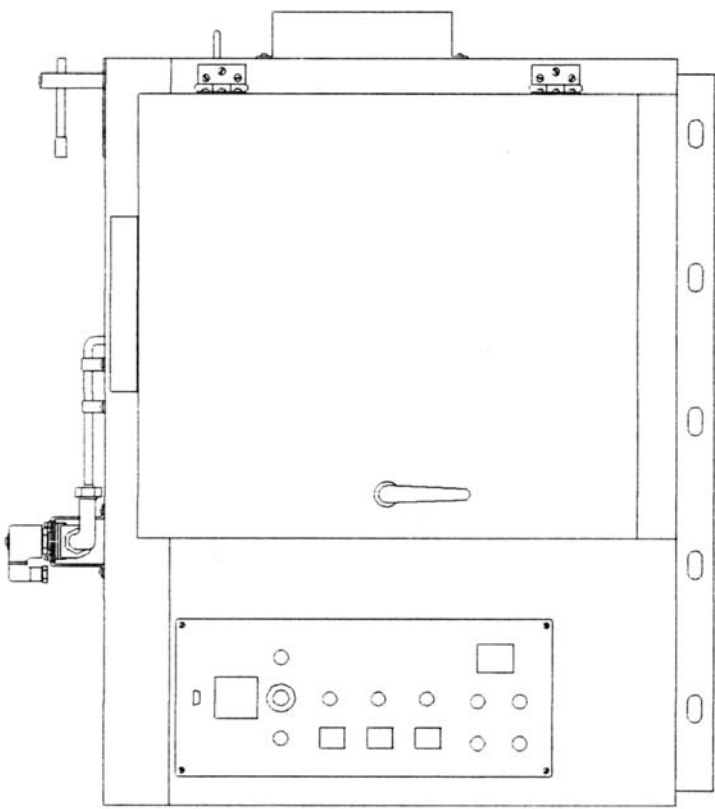


**Figura 5.10:** Evolución de las lecturas *brutas* y *netas* así como de la puesta a cero para un ciclo de evolución de temperatura con un calentamiento y enfriamiento en el rango entre 26,5 y 37 °C.

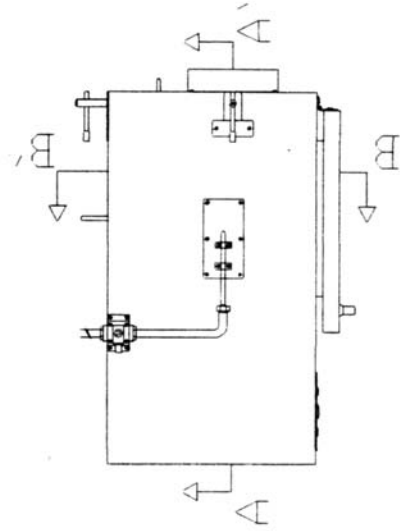
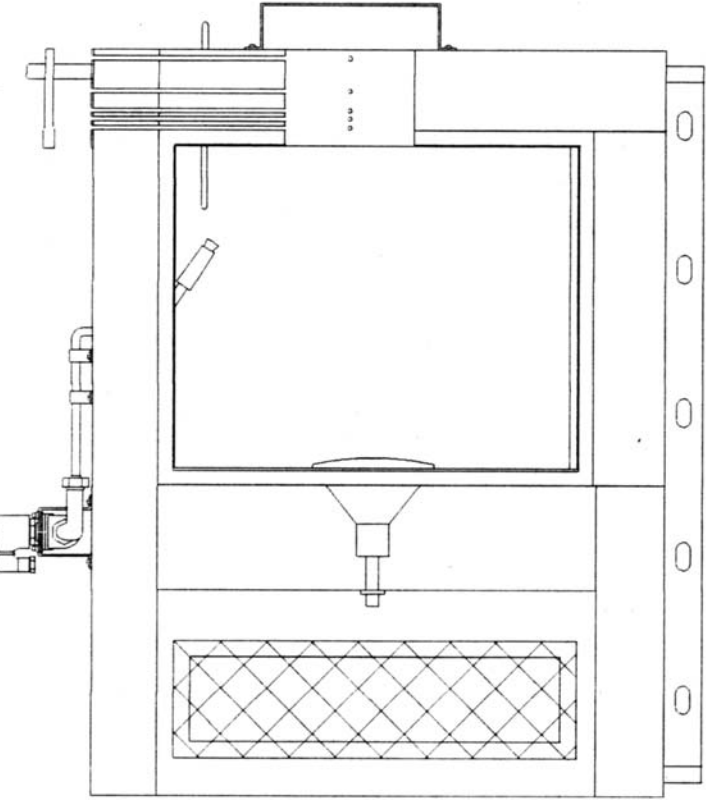
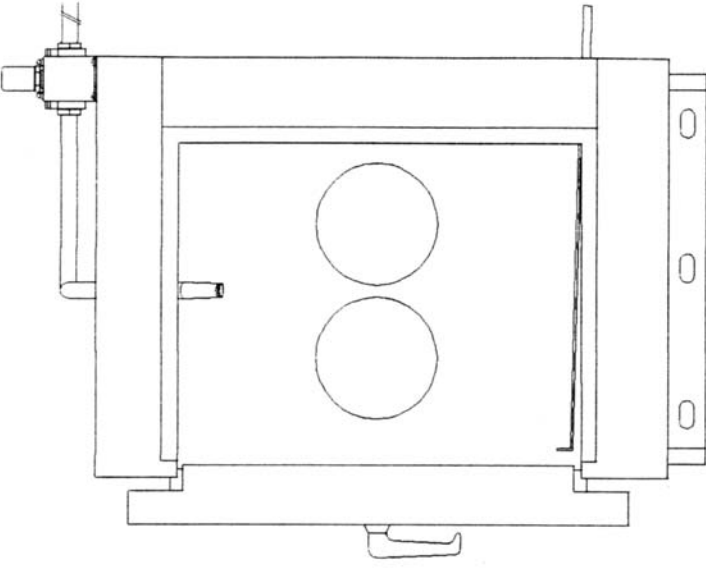
Una vez desarrollado el prototipo, se ha observado su utilidad a través de los diferentes ensayos realizados que se describen en los siguientes capítulos. Este prototipo constituye un punto de partida para el desarrollo de equipos similares que puedan mejorar el diseño de aspectos como la integración de los sistemas de medida de dilatación en el conjunto, o la posibilidad de descender la temperatura, incluso a regímenes bajo cero. El rango de utilización no debe circunscribirse al estudio del posible deterioro que el calentamiento por radiación produce que, como se discutirá adelante, necesitaría un periodo de tiempo inviablemente largo para expresarse, y las mayores posibilidades de este equipo se centran en su implementación para adecuarlo a otros ensayos como el de cristalización de sales o hielo deshielo, debido a que estos usualmente desestiman la importante influencia que puede tener en el resultado el uso de una fuente de calentamiento por radiación.



**Cámara Experimental**  
 0 cm 30







**Cámara Experimental**  
0 cm 30





## **6. Perfiles de distribución longitudinal de temperaturas en regímenes de radiación y convección: implicaciones para la generación de formas planares de deterioro.**

La disposición más habitual de un material pétreo expuesto al calentamiento solar en un edificio es como sillar o placa de recubrimiento en las fachadas del mismo. En ambas situaciones el material presenta una única cara recibiendo la radiación. Esta situación tenderá a generar una distribución de temperaturas en perfil en el seno del material en la cual la temperatura desciende desde la superficie hacia el interior. Si consideramos que en general la piedra es un material de baja conductividad térmica, la magnitud de estos gradientes aumentará a medida que el material se calienta, debido a la pobre conducción de calor de las capas externas a las más internas.

La diferencia de temperatura que se producen en perfil en el seno de un material pétreo calentado unidireccionalmente ha sido el principal objeto de la mayoría de experimentos y especulaciones sobre meteorización por insolación. Como se mencionaba en los antecedentes, la hipótesis de la formación de desplazados térmicos a partir de las diferencias de temperatura diurnas-nocturnas y los gradientes generados en el interior de la roca se remonta a Shaler (1869) que apuntaba que el calentamiento de la superficie de una roca tendería a separar su parte externa de la masa interior, formando una corteza, siempre que la cohesión del material lo permitiese.

A lo largo de toda la historia de esta hipótesis, los estudios conducentes a evaluar la potencialidad de este tipo de deterioro se han limitado generalmente a la adquisición de una única temperatura de superficie para relacionarla con la temperatura ambiental y/o un conjunto limitado de medidas a profundidades arbitrarias tanto en las medidas de campo como en los ensayos de laboratorio (Branner, 1896; Merrill, 1906; Roth, 1965; Peel, 1974; Smith, 1977; Winkler, 1977; Kerr et al., 1984; McGreevy, 1985; Jenkins y Smith, 1990; Hall y Hall, 1991; Galán et al., 1992; Warke y Smith, 1994; Warke et al., 1996; Halsey et al., 1998; Smith et al., 2000; Gómez-Heras y Fort, 2002; Iñigo y Vicente-Tavera, 2002; Turkington et al., 2002; Hall y André, 2003).

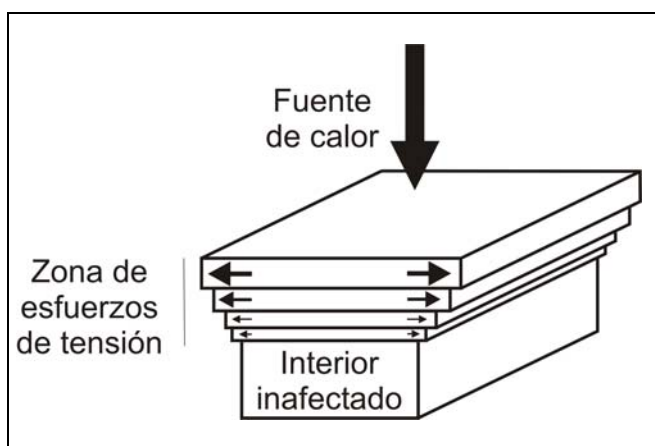
A partir de este enfoque en la toma de medidas, se ha generalizado la percepción de la distribución de temperatura en los materiales pétreos a causa de la insolación como

un conjunto de isothermas paralelas a la superficie cuyo gradiente generaría formas de deterioro planas con un espesor considerable, debido a los esfuerzos de tensión y cizalla producidos por “rodajas finitas” de material sometidas a dilataciones diferenciales. La generación de desplazados a partir de este fenómeno se ilustra en el modelo de interpretación del bloque diagrama de la figura 6.1.

**Tabla 6.1:** Profundidades de muestreo de temperaturas en ensayos de distintos autores

Autor(es)	Tipo de ensayo	Profundidades toma de medidas (cm)			
Roth, 1965	Campo	8,9	19		
Peel, 1974	Campo	1	3	7	13
Smith, 1977	Campo	5	10		
Kerr et al., 1984	Campo	6			
McGreevy, 1985	Campo/laboratorio	5			
Hall y Hall, 1991	Laboratorio	2,8	3,1		
Warke y Smith, 1994	Laboratorio	2,5			
Warke et al., 1996	Laboratorio	2,5			
Halsey et al., 1998	Campo	2,5			
Gómez-Heras y Fort, 2002	Laboratorio	1,8	2,3	4,8	
Iñigo y Vicente-Tavera, 2002	Campo	10			
Turkington et al., 2002	Laboratorio	1	2,5	4	5,5

La existencia de fenómenos de desplazado térmico causados por las altas temperaturas (como se verá en la segunda parte de esta tesis), ha favorecido también la



**Figura 6.1:** Bloque diagrama que muestra una interpretación de los efectos dinámicos de los gradientes térmicos en un material pétreo afectando a porciones gruesas de roca (modificado de Hall y Hall, 1991).

extrapolación de estos fenómenos al campo de las temperatura ambientales. Así mismo, algunas metodologías de ensayo acelerado de envejecimiento térmico, se han basados en esta extrapolación y han utilizado las altas temperaturas para acelerar el proceso de deterioro (Griggs, 1936; Siegesmund et al., 2000a; 200b; Weiss et al., 2003; Weiss et al., 2004, Koch y Siegesmund, 2004), lo que se puede

considerar como un error metodológico, debido a que al ensayar los materiales con altas temperaturas, en realidad se está cambiando el fenómeno a ensayar.

La diferencia en la respuesta térmica de un material pétreo con respecto a si el régimen de calentamiento es por radiación o por convección es un hecho comprobado (Warke y Smith, 1998). Sin embargo hasta la fecha los experimentos que se han realizado utilizaban regímenes de convección no comparables con los de radiación, en tanto en cuanto se utilizaban ciclos simples de temperatura ambiental por convección basados en dos temperaturas extremas que se sucedían en escalones y no sinusoidalmente (que es como se distribuyen las temperaturas ambientales en un régimen radiante). Las diferencias entre los regímenes de calentamiento tienen implicaciones muy importantes, en especial en lo que se refiere a las normativas y metodologías de ensayo de los materiales pétreos, las cuales utilizan cámaras climáticas que calientan por convección y por tanto pueden “falsear” el comportamiento de los materiales al descuidarse la anisotropía térmica que la radiación produce.

El régimen térmico de un material sometido a una fuente radiante de calor va a depender de la cantidad de radiación recibida y de las propiedades térmicas de la roca. El albedo se ha reconocido como el factor más influyente en la temperatura superficial (Kelly y Zumberge, 1961; Peel, 1974; Kerr et al., 1984), puesto que el albedo determina que cantidad de la radiación recibida en la superficie es absorbida y, así, puede conducirse a capas más internas del material (Geiger, 1966). La conductividad térmica del material condicionará la cantidad de calor que se transmite a las zonas más internas del material.

Como se puede deducir a partir de las leyes de conducción del calor, las temperaturas decrecen de manera exponencial con la profundidad; Por ello, es importante que cualquier estudio de meteorización por insolación se concentre en la naturaleza de los gradientes en esta zona externa.

Los procesos de rotura de los materiales pétreos están muy influenciados por la escala en la que actúan los mecanismos de deterioro (Smith, 1996) y la frecuencia de los ciclos de calentamiento tiene una importancia considerable en la consideración de los efectos de fatiga mecánica que pudiera llevar asociada la insolación (Halsey et al., 1998). Un material pétreo expuesto en cualquier ambiente natural experimentará toda una serie de ciclos de temperatura sobreimpuestos. Desde los cambios seculares

relacionados con posibles cambios climáticos hasta los cambios diarios debidos a los ciclos de día y noche. Más aún, las fluctuaciones de temperatura de corto periodo, debidas al viento o las nubes, se superimponen a los ciclos diurnos (Jenkins y Smith, 1990; Halsey et al., 1998; Hall y Andre, 2001). Sin embargo no existen estudios de laboratorio sobre la respuesta térmica de los materiales a estos ciclos de corto rango.

Puesto que es esperable que estos ciclos de corto rango afecten solo a la parte más superficial del material, es importante que la modelización en laboratorio de los ciclos de corto rango se relacione con una alta frecuencia de muestreo de las temperaturas en el tiempo y una alta densidad de puntos de toma de temperatura en el seno del material.

En todo caso, debido a que los ensayos de envejecimiento acelerado por insolación no han obtenido hasta la fecha resultados significativos, esta idea ha persistido desde el punto de vista de los modelos de comportamiento frente a la insolación y se mantiene la percepción de los gradientes de temperatura que producirían el deterioro por insolación afectando a los “centímetros exteriores de roca” (Peel, 1974), y permanece la cuestión de hasta que punto es efectiva la meteorización por insolación.

El objetivo de este capítulo es la obtención de perfiles longitudinales de temperaturas en materiales pétreos de construcción de diferentes composiciones petrológicas, bajo regímenes de radiación y convección, y establecer las diferencias existentes entre los distintos materiales y regímenes de calentamiento, aumentando la densidad de muestreo con respecto a anteriores estudios realizados sobre el tema.

También se realiza un estudio de las implicaciones que el calentamiento por radiación puede tener en la generación de desplazados térmicos como forma de deterioro tradicionalmente adscrita en algunos de los casos a causas térmicas, así como la viabilidad de realizar ensayos acelerados de insolación en un tiempo comercialmente aceptable, con vistas al posible establecimiento de una rutina metodológica para el ensayo de la resistencia de los materiales pétreos a la meteorización por insolación.

## **6.1. Materiales y Métodos.**

Para realizar este estudio se escogieron cuatro materiales pétreos representativos por su uso como piedra de construcción tanto en edificios históricos como en obra nueva. Se

escogieron dos materiales calcáreos y dos ígneos. En los materiales calcáreos se busco principalmente que presentaran porosidades diferentes, mientras que en los ígneos que el albedo fuera lo más diferente posible. Así se seleccionaron los materiales conocidos comercialmente como *Caliza o Piedra Bateig Fantasía*, *Caliza de Colmenar*, *Granito Blanco Castilla* y *Granito Negro Ochavo*.

Las muestras se caracterizaron petrográfica y petrofísicamente a fin de relacionar los parámetros petrofísicos y los perfiles de temperatura obtenidos. La caracterización petrográfica de las muestras se realizó con microscopio óptico de polarización Zeiss Axioskop y se clasificaron según los criterios de Folk (1959) y Streckeisen (1976).

La caracterización cromática de los materiales es de especial importancia debido a que el albedo, o claridad relativa de una superficie cuando es iluminada, es uno de los parámetros que influyen en los regímenes térmicos de los materiales, puesto que condiciona la cantidad de energía absorbida por el material. La medida del color se llevó a cabo en partir de una malla de 12 puntos en la superficie de la roca. con un espectrofotómetro (MINOLTA CM-2002), seleccionándose los parámetros  $L^*$   $a^*$   $b^*$  según la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, 1986) y el índice de blanco (WI) y amarillo (YI) según la ASTM E313 (American Society for Testing and Materials, 2000).

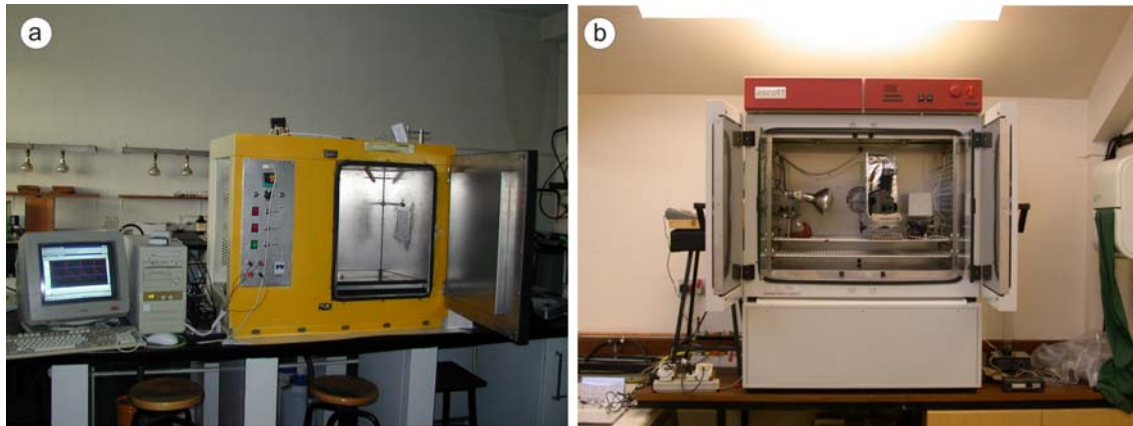
La caracterización del comportamiento hídrico de los materiales se realizó de acuerdo a la norma RILEM, 1980 y la caracterización del sistema poroso se realizó con un Porosímetro de Intrusión de Mercurio Micromeritics Autopore IV. La caracterización mecánica dinámica se llevó a cabo mediante la medida de la velocidad de propagación de ondas P de ultrasonidos ( $V_p$ ) con un medidor de la velocidad de pulsos ultrasónicos PUNDIT, C.N.S. Electronics. También se definió el índice de anisotropía ( $I_A$ ) del material definido como:

$$I_A = 100 \cdot \left( 1 - \frac{2V_1}{V_2 + V_3} \right)$$

Donde  $V_1$   $V_2$  y  $V_3$  las velocidades obtenidas en cada una de las direcciones del espacio, siendo  $V_1$  la menor de todas ellas.

Estos materiales se sometieron a una serie de ciclos de temperatura para observar la respuesta térmica de los materiales. Se realizaron tanto ciclos de insolación, es decir,

ciclos de temperatura obtenidos mediante radiación según la metodología propuesta en el capítulo anterior, como ciclos de temperaturas obtenidas por convección según el método tradicional utilizado en el ensayo de materiales pétreos.



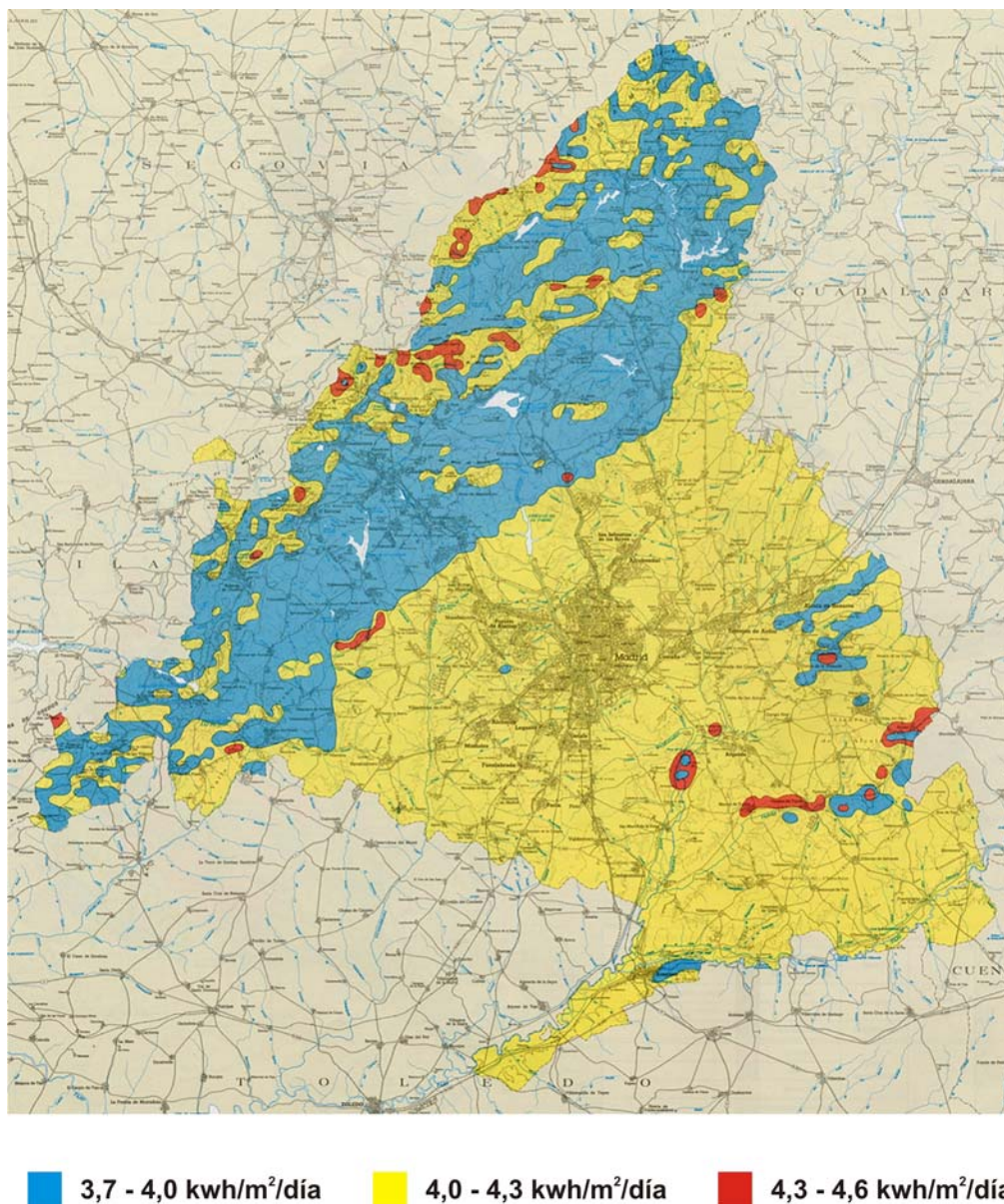
**Figura 6.2:** Cámaras experimentales utilizadas en este ensayo. Cámara con calentamiento por radiación (a) que corresponde al prototipo diseñado para esta tesis, descrito en el capítulo anterior, y cámara climática convencional con régimen de calentamiento por convección (b).

Para los ensayos de radiación se utilizó la cámara automática descrita en el capítulo anterior, mientras que para los ensayos de convección se utilizó una cámara climática programable convencional WTB Binder KBF240 (Figura 6.2). Los ensayos se han realizado en ambos casos basándose en el modelo de distribución de temperaturas en el medio urbano de Madrid. La elección de Madrid como fuente de los datos se justifica tanto por razones climáticas como culturales y económicas. El carácter continental de Madrid, así como su altitud elevada condiciona un clima con fuertes oscilaciones térmicas y temperaturas relativamente elevadas. La insolación en el núcleo urbano se sitúa en unos niveles altos entre 4 a 4,3 kWh/m<sup>2</sup>/día (Figura 6.3). La ciudad de Madrid posee un amplio patrimonio arquitectónico construido con Piedra Natural y es, además, el principal centro de consumo en España de los materiales utilizados en este estudio.

El ciclo experimental utilizado para la determinación de los perfiles de temperatura y para los ensayos de envejecimiento acelerado por insolación es un ciclo sencillo, sin incluir la acción del agua, con una rampa de subida con insolación continua y una rampa de bajada sin ninguna radiación. Está basado en el patrón de distribución de temperaturas diarias obtenido de una base de datos correspondientes a los años de 1993 a 1996 (ambos incluidos) recogidos en una estación climática situada en el Palacio Real



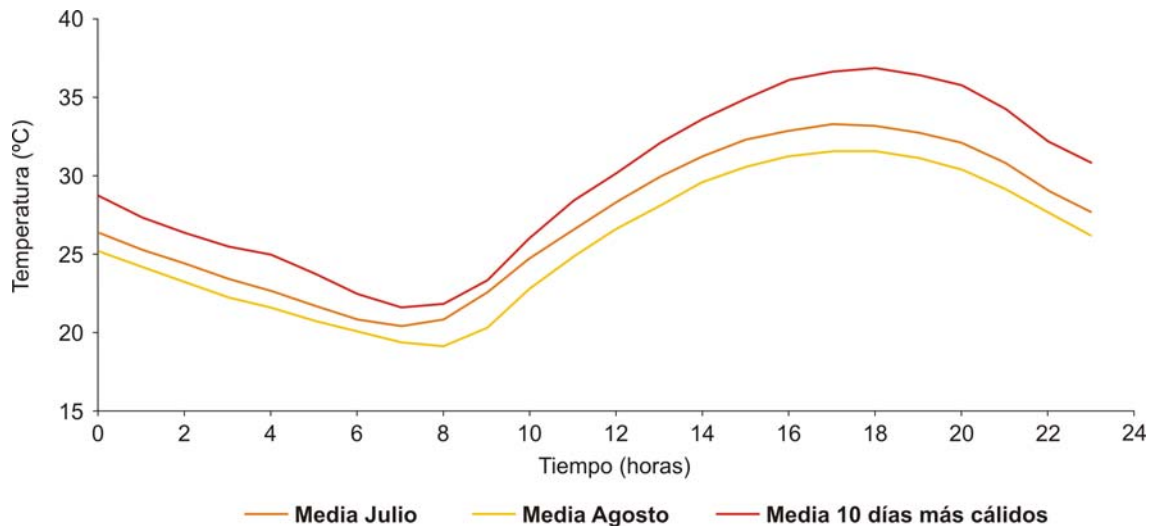
de Madrid como parte del proyecto CICYT *El Palacio Real de Madrid: La degradación de sus materiales pétreos, medio ambiente que lo rodea y estudios para su restauración*. El análisis de estos datos de temperatura es inédito, aunque algunos de estos parámetros se encuentran publicados (López de Azcona et al., 1996).



**Figura 6.3:** Niveles medios de radiación solar en la Comunidad de Madrid (kwh/m<sup>2</sup>/día). (IGME, 1988).

Se realizó un tratamiento estadístico de los datos de los meses de verano (julio y agosto) por ser estos meses en los que el fenómeno de insolación es más intenso. La figura 6.4 muestra el resultado de las curvas medias de los meses de julio y agosto para

este periodo. También se halló una curva adicional con los valores medios de los diez días con mayor temperatura del verano (21 de junio – 21 de septiembre) para cada uno de los años del periodo 1993-1996.



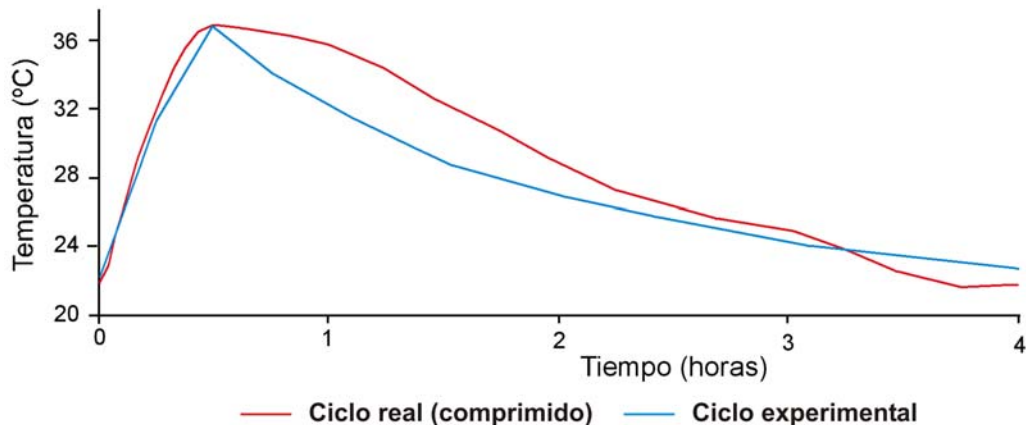
**Figura 6.4:** Curvas diarias medias de temperatura ambiental en los meses de verano en la ciudad de Madrid para el cuatrienio 1993-1996.

Todas las curvas de distribución de temperaturas diarias tienen una morfología similar, encontrándose la principal diferencia en los valores máximos y mínimos de las temperaturas alcanzadas. Para diseñar el ciclo experimental se ha escogido la curva de la media de los días más cálidos en cada verano porque siendo reflejo de un régimen de temperaturas reales, nos permite además magnificar los efectos que el proceso de insolación puede producir en el material. Para realizar el ciclo se ha tomado la curva de descenso de la temperatura en el ciclo real y se ha ajustado a la curva de descenso libre de temperatura en el interior de la cámara. Este ajuste nos define la compresión del ciclo de bajada con respecto al ciclo real que es del 95 %.

Posteriormente se define la velocidad de la rampa de subida y se halla la relación de compresión para el ciclo de subida cuyo valor debe ser lo más cercano posible al hallado para el ciclo de bajada. Se ha decidido optar por una emisión constante de radiación disminuyéndose la potencia de las lámparas a un 60 %. De esta manera se obtiene una rampa de subida de velocidad 30 °C/hora con una compresión del 75 %. La diferencia en la compresión de las rampas de subida y bajada se debe a la simplificación realizada al no tenerse en cuenta las pulsaciones de radiación.



Así pues el ciclo experimental queda definido como se observa en la figura 6.5 en la que se compara con el ciclo real una vez aplicado el algoritmo de compresión  $0,95 \cdot t$  para la curva de subida y  $0,75 \cdot t$  para la de bajada, siendo  $t$  el tiempo.



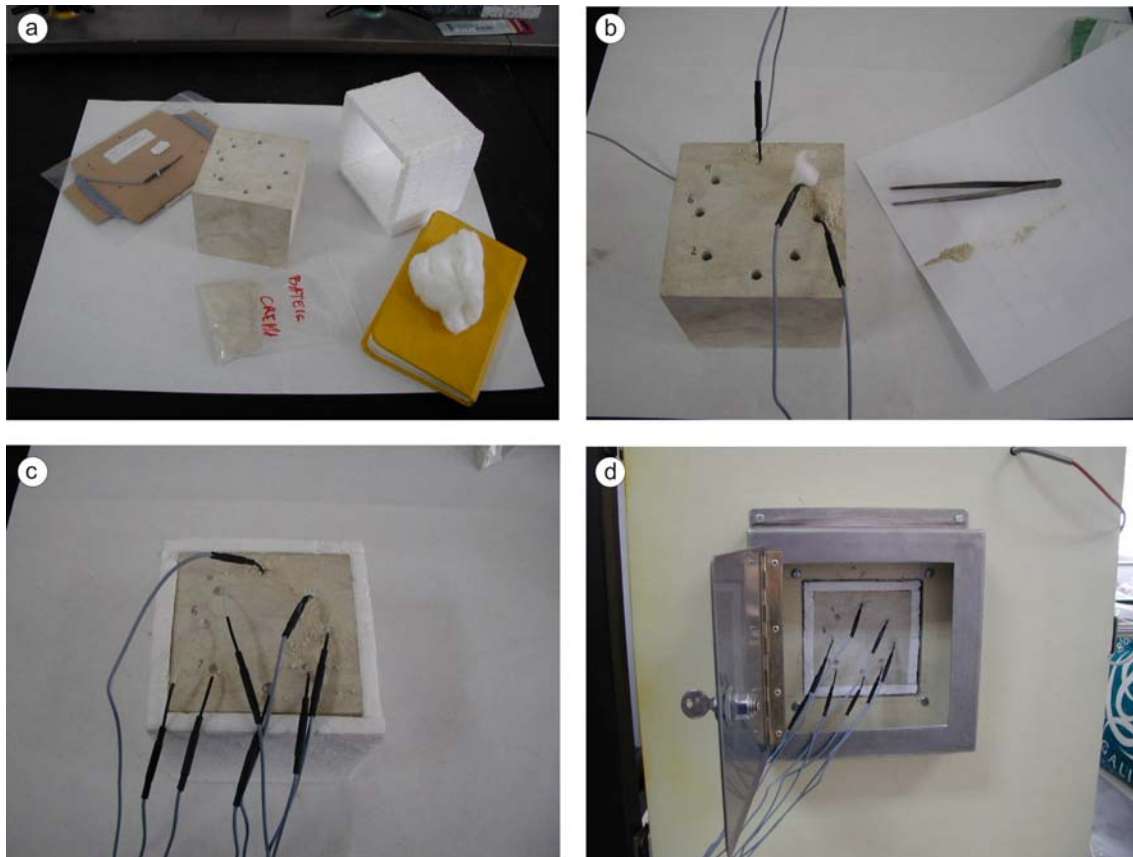
**Figura 6.5:** Ciclo experimental de temperaturas usado tanto en los ensayos de radiación como en los de convección y su relación con la distribución diaria de temperaturas en los meses de verano en Madrid.

Para el estudio de la penetración de los ciclos de temperatura de corto rango se realizó un ensayo no basado en una distribución de temperaturas concretas, sino en el encendido y apagado de las lámparas de infrarrojos durante unos tiempos determinados. Así se siguió una secuencia: 5 minutos encendidas, 5 minutos apagadas, 10 minutos encendidas, 5 minutos apagadas, 2 minutos encendidas, apagado y final del ciclo.

Las muestras de roca son bloques de cantera de 10 x 10 x 10 cm. El uso de bloques de tamaño relativamente grande se justifica dado que la importancia de los efectos de la insolación aumenta proporcionalmente a su tamaño (Rice, 1976). Las muestras se situaron con una única cara expuesta verticalmente. Los bloques se aislaron completamente a excepción de la cara expuesta con una cubierta de poliestireno expandido de 1,5 cm de espesor. Las muestras se sometieron a dos ciclos consecutivos de radiación o convección, según el caso. La respuesta térmica del material se determinó midiendo la temperatura en la superficie y en ocho puntos a distintas profundidades en el interior del material.

Las medidas de temperatura se recogieron a intervalos de un minuto. La toma de medidas de temperatura en la superficie de las rocas se realizaron con termómetros de

infrarrojos *Raytek Raynger MX4* y *Minolta Land Cyclops 330S*. La termometría de infrarrojos aseguraba la adquisición de temperaturas de superficie sin usar sensores de contacto, que pueden influenciar la medida obtenida debido a un *efecto sensor*, es decir, la influencia que la materialidad de una sonda de temperatura superficial puede tener en el valor de temperatura obtenido. Un sensor, sea del material que sea, tendrá unas propiedades térmicas determinadas frente a la radiación que van a influir en las medidas con él obtenidas. Las medidas de temperatura de profundidad se realizaron con termistores de bola (con cabezal 2 mm de diámetro) conectados a un data-logger 12 bits *Grant instruments squirrel*. Para ello se realizaron una serie de taladros por la parte posterior de las muestras a ensayar (Figura 6.6) en una disposición espiral de las profundidades. La profundidad de las perforaciones se controló mediante un calibre electrónico convencional. Una vez realizadas las perforaciones se introdujeron las sondas de temperatura, rellenándose los agujeros con la misma roca pulverizada y taponándose el final para fijar la sonda con lana de algodón.



**Figura 6.6:** Distintos pasos de la preparación de las muestras para su ensayo: Materiales utilizados (a), introducción de las sondas de temperatura (b, c) y situación de la muestra en la cámara de radiación (d).

Puesto que uno de los objetivos de este experimento era aumentar la densidad de muestreo de las temperaturas en el interior del material, se puso especial interés en introducir las sondas lo más cerca posible de la superficie. Así, en la Piedra Bateig las 8 sondas se introdujeron a 2, 4, 6, 10, 15, 20, 40 y 60 mm de la superficie.

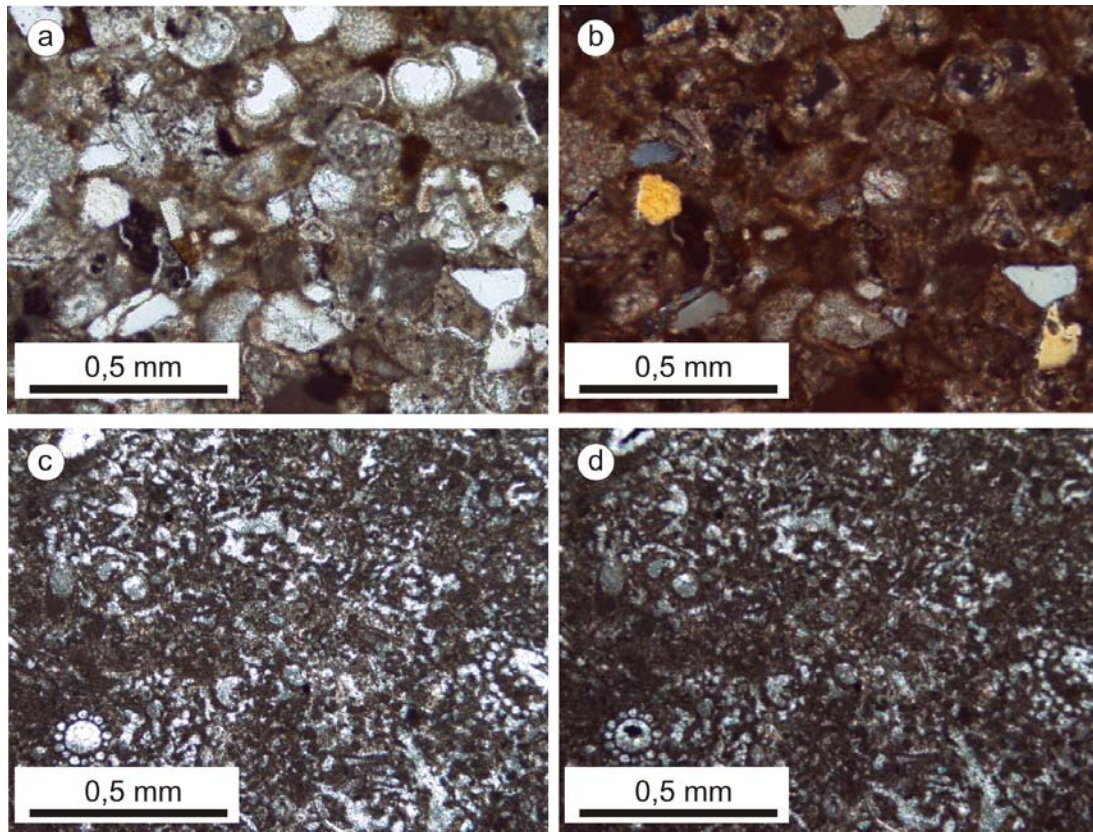


**Figura 6.7:** Al intentar alcanzar con el taladro la zona más somera de los materiales más tenaces, estos se rompían, por lo que se aumentó la distancia entre los taladros y la superficie.

La Piedra Bateig al ser un material blando permitió esta disposición de las sondas. Sin embargo en el resto de los materiales esta disposición fue imposible de obtener, debido a que el material se fracturaba en la superficie al realizar los taladros más cercanos a la superficie (Figura 6.7). Debido a este problema y a la dificultad de perforar los otros materiales se decidió aumentar el espaciado de las sondas de temperatura y a distanciar los taladros de la superficie. Así para las muestras de *Caliza de Colmenar*, *Granito Blanco Castilla* y *Granito Negro Ochavo*, las sondas se situaron a 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 y 90 mm.

## 6.2. Caracterización de los materiales.

Los materiales calcáreos utilizados son la *Piedra Bateig Fantasía* y la *Caliza de Colmenar*. La *Piedra Bateig Fantasía* (Figura 6.8a y b) se clasifica como una biomicrita con transiciones a bioesparita, debido a que la roca presenta laminaciones. Los componentes principales del esqueleto son foraminíferos, briozoos, bivalvos y placas y espículas de equinodermos. El mineral detrítico principal es el cuarzo, que aparece en ocasiones en forma de cristales euhedrales. En menor proporción se observan feldespatos potásicos. La matriz es fundamentalmente micrítica. La *Caliza de Colmenar* (Figura 6.8c y d) es una biomicrita de grano muy fino con restos de caráceas y gasterópodos como granos principales del esqueleto. Estos fósiles se observan frecuentemente rellenos de cementos esparíticos, que en algunos casos presentan disposiciones geopetales.

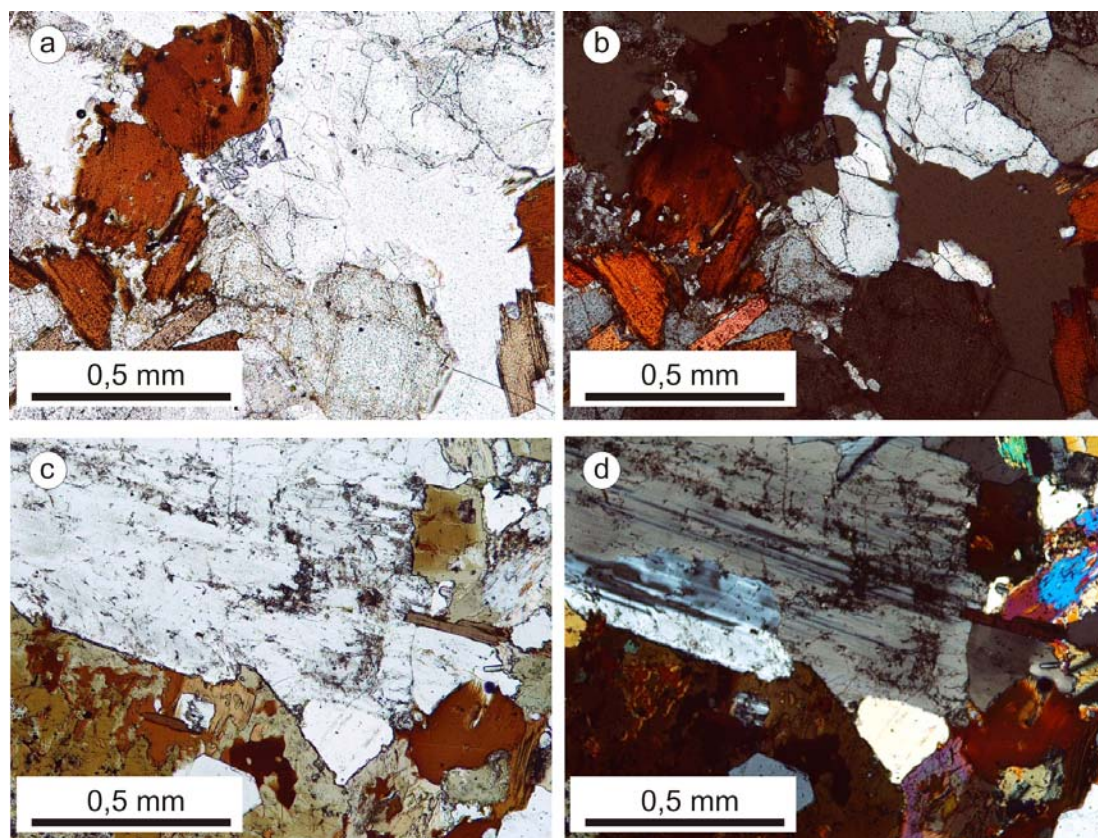


**Figura 6.8:** Fotomicrografías de la *Piedra Bateig Fantasia* con nícoles paralelos (a) y cruzados (b) y la *Caliza de Colmenar* con nícoles paralelos (c) y cruzados (d)

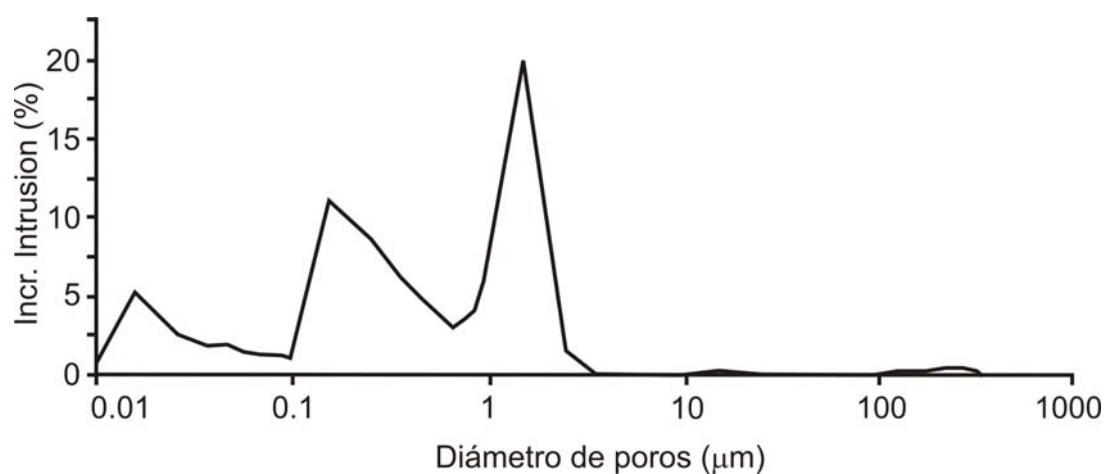
Con respecto a los materiales ígneos, el Granito *Blanco Castilla* (Figura 6.9a y b) es un monzogranito panalotriomorfo de grano fino con tendencia inequigranular. Los principales minerales constituyentes son cuarzo, feldespato potásico perítico, plagioclasa con zonado oscilatorio y biotita. Zircón y apatito son los minerales accesorios más abundantes. El material conocido como *Negro Ocho* (Figura 6.9c y d) es una diorita equigranular de grano fino con hornblenda, biotita, ortopiroxeno y plagioclasa como minerales principales. Presenta texturas densas de reemplazamiento parcial entre piroxeno-anfíbol-biotita. Los minerales accesorios principales son opacos.

Las figuras 6.10 a 6.13 recogen las distribuciones de poros en cada uno de los materiales y la tabla 6.2 resume las propiedades petrofísicas de color, comportamiento hídrico, porosimetría de mercurio y propiedades mecánicas dinámicas.

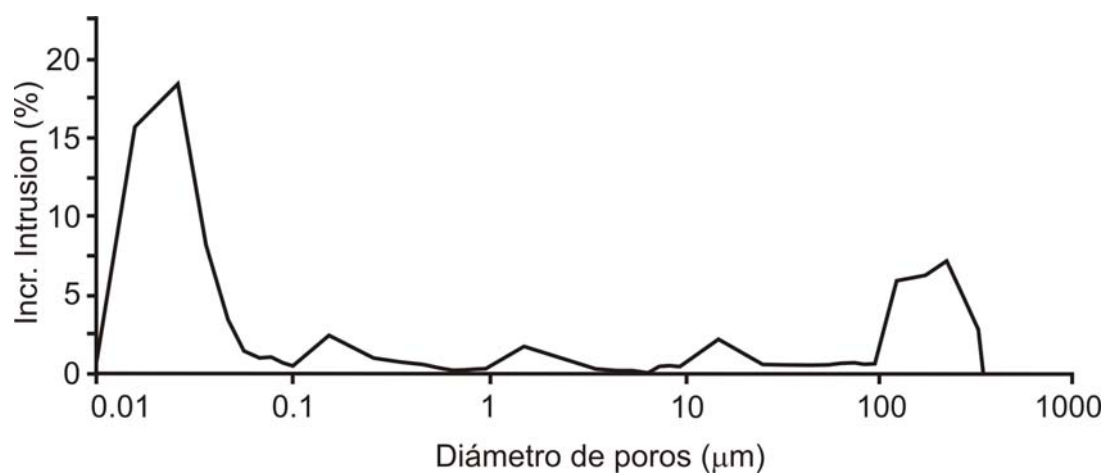




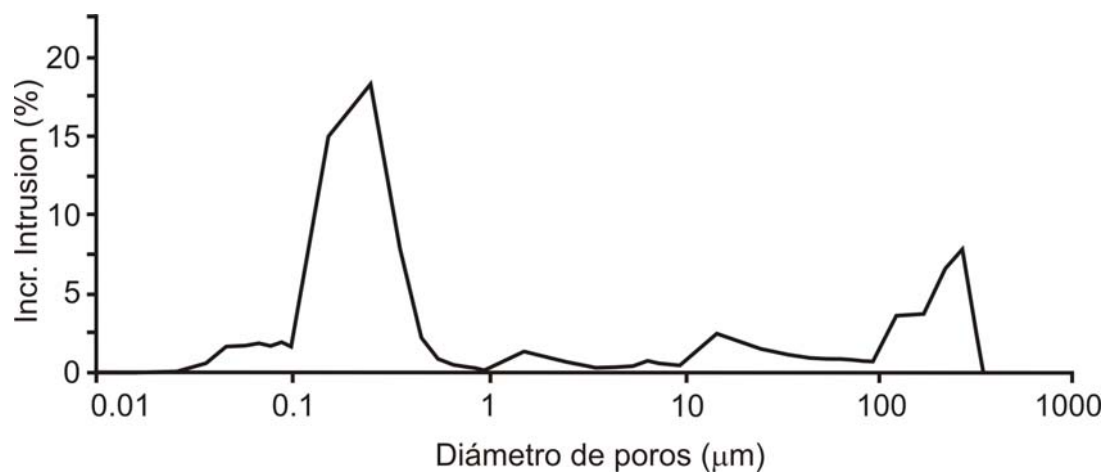
**Figura 6.9:** Fotomicrografías de *Granito Blanco Castilla* con nícoles paralelos (a) y cruzados (b) y *Negro Ocho* con nícoles paralelos (c) y cruzados (d).



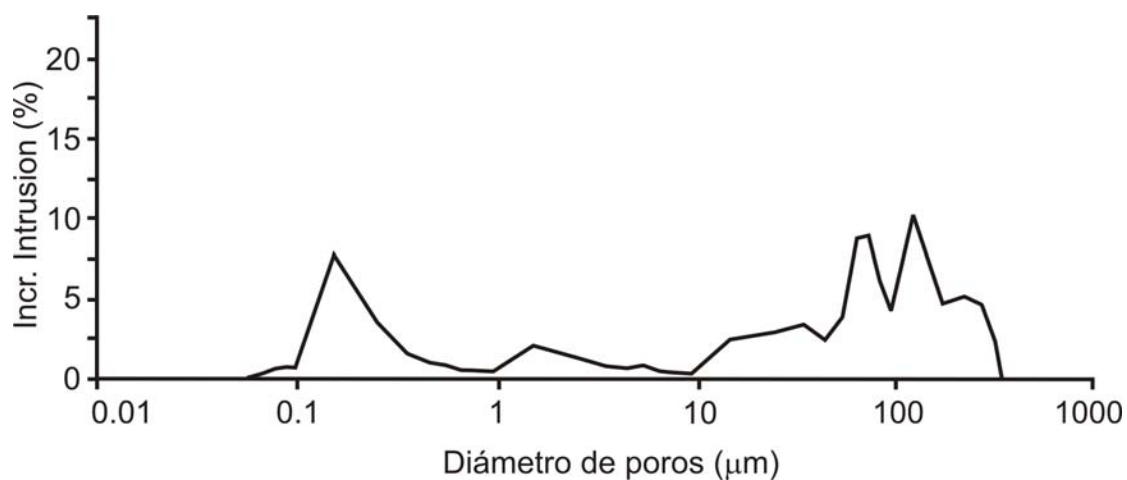
**Figura 6.10:** Distribución de la porosidad (Porosimetría de Intrusión de Mercurio) de la *Piedra Bateig Fantasía*.



**Figura 6.11:** Distribución de la porosidad (Porosimetría de Intrusión de Mercurio) de la *Caliza de Colmenar*.



**Figura 6.12:** Distribución de la porosidad (Porosimetría de Intrusión de Mercurio) del *Granito Blanco Castilla*.



**Figura 6.13:** Distribución de la porosidad (Porosimetría de Intrusión de Mercurio) del *Granito Negro Ochovo*.

**Tabla 6.2:** Resumen de las características petrofísicas de los materiales estudiados.

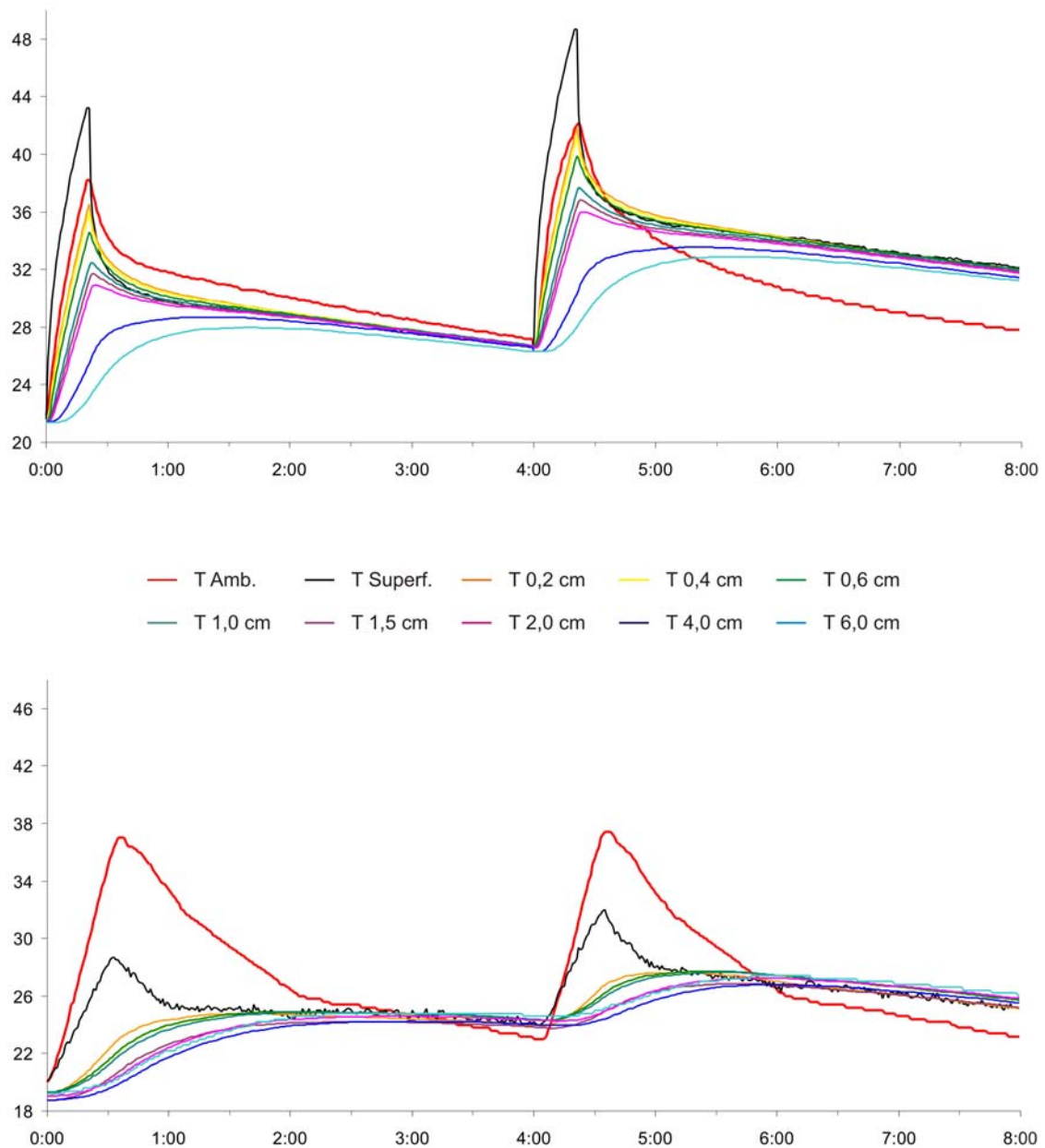
	<b>Bateig Fant.</b>	<b>Colmenar</b>	<b>Castilla</b>	<b>Ochavo</b>
<b>L</b>	77,0 ± 1,0	78,3 ± 0,8	73,0 ± 5,0	44,0 ± 2,0
<b>a*</b>	1,5 ± 0,1	3,3 ± 0,3	-0,3 ± 0,2	-1,0 ± 0,1
<b>b*</b>	10,9 ± 0,6	9,9 ± 0,6	3,0 ± 1,0	0,5 ± 0,4
<b>Índice de blanco (WI)</b>	12,0 ± 2,0	17,0 ± 2,0	36,0 ± 9,0	5,0 ± 3,0
<b>Índice de amarillo (YI)</b>	19,0 ± 1,0	17,4 ± 0,9	5,0 ± 3,0	1,0 ± 1,0
<b>Saturación al agua (% peso)</b>	9,60 ± 0,30	1,30 ± 0,20	0,44 ± 0,06	0,24 ± 0,02
<b>Porosidad accesible al agua (%)</b>	20,60 ± 0,50	3,30 ± 0,50	1,10 ± 0,10	0,70 ± 0,07
<b>Compacidad</b>	0,79	0,97	0,99	0,99
<b>Porosidad accesible al mercurio</b>	19,3	3,9	0,6	0,5
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,15	2,57	2,61	2,86
<b>Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,66	2,68	2,62	2,87
<b>Superficie específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	5,54	1,42	0,03	0,01
<b>Mediana del tamaño de poros (μm)</b>	0,42	0,07	0,35	69,81
<b>Media del tamaño de poros (μm)</b>	0,06	0,04	0,25	0,91
<b>Velocidad de ultrasonidos Vp (m/s)</b>	3690 ± 30	5800 ± 100	4180 ± 40	5590 ± 40
<b>Índice de anisotropía</b>	2,56	1,68	10,03	4,96

### 6.3. Evolución y perfiles de distribución de temperaturas en regímenes de convección y radiación.

Las figuras 6.14 a 6.17 recogen la evolución de temperaturas en los materiales para los ciclos ensayados de convección y radiación. Las figuras 6.18 a 6.21 muestran los perfiles de temperatura (tautocronas) en cada uno de los materiales en diversos momentos de los ciclos de radiación y sus homólogos en convección. En cada una de las figuras se recogen los perfiles a los 15 minutos de comenzado el ciclo (a), en el máximo de temperatura superficial (b), a los 45 (c) y a los 120 minutos (d), en el punto final del primer ciclo (e) y en el máximo de temperatura superficial del segundo ciclo (f).

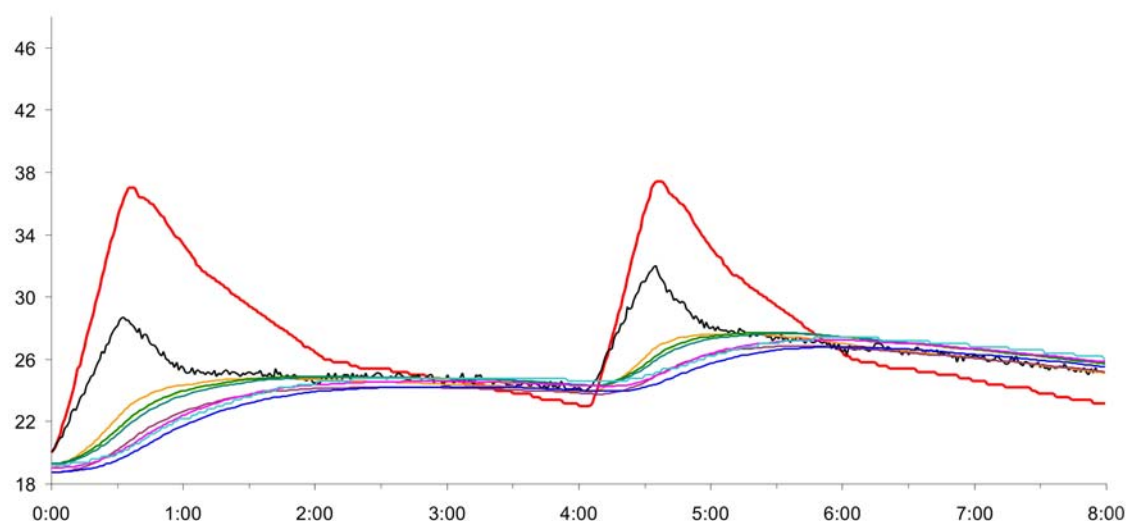
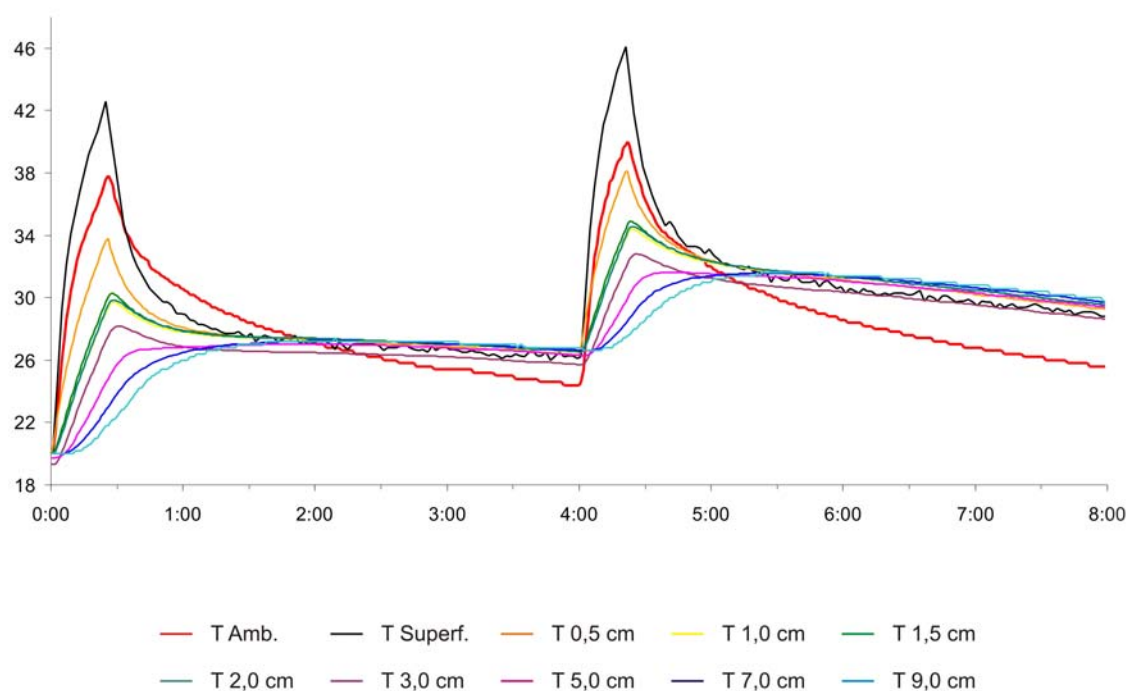
Las tablas 6.3 a 6.6 resumen una serie de parámetros de los ciclos experimentales. Estos datos se han simplificado seleccionando, en función de su representatividad, cinco de los ocho puntos donde se tomaron medidas. Los parámetros seleccionados incluyen la **temperatura máxima y mínima** medida en cada uno de los puntos, así como su

diferencia, para cada uno de los dos ciclos, dado que la dilatación térmica es directamente proporcional al incremento de temperatura. Se incluye también la **diferencia máxima entre la temperatura ambiental y la temperatura superficial**, lo que nos indica como de alejado se encuentra el régimen de temperatura en el material con respecto a la temperatura de la cámara. El valor de la temperatura ambiental es el parámetro que se suele suponer como “absoluto” en los ensayos de materiales pétreos. Esta diferencia nos señala como de alejados estamos de esa suposición.



**Figura 6.14:** Evolución de las temperaturas en la *Piedra Bateig* a lo largo de los dos ciclos experimentales de radiación (arriba) y convección (abajo).

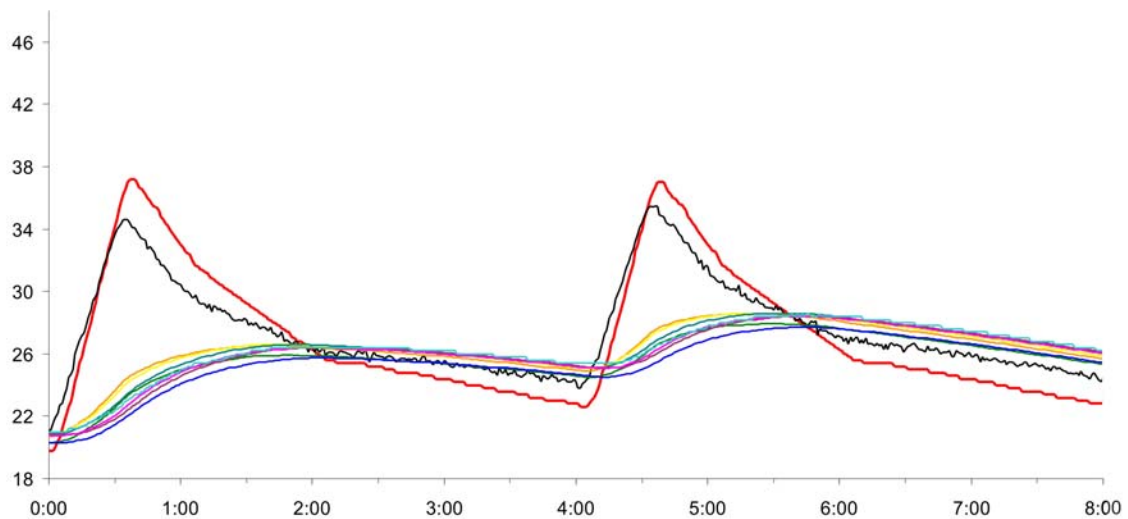
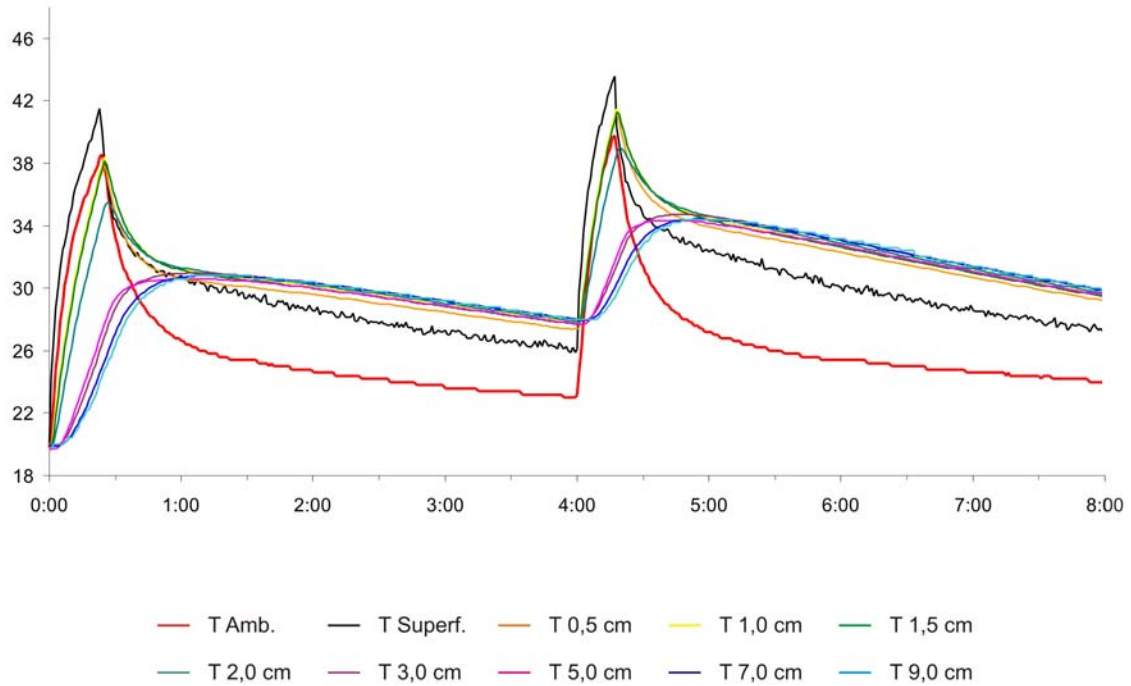




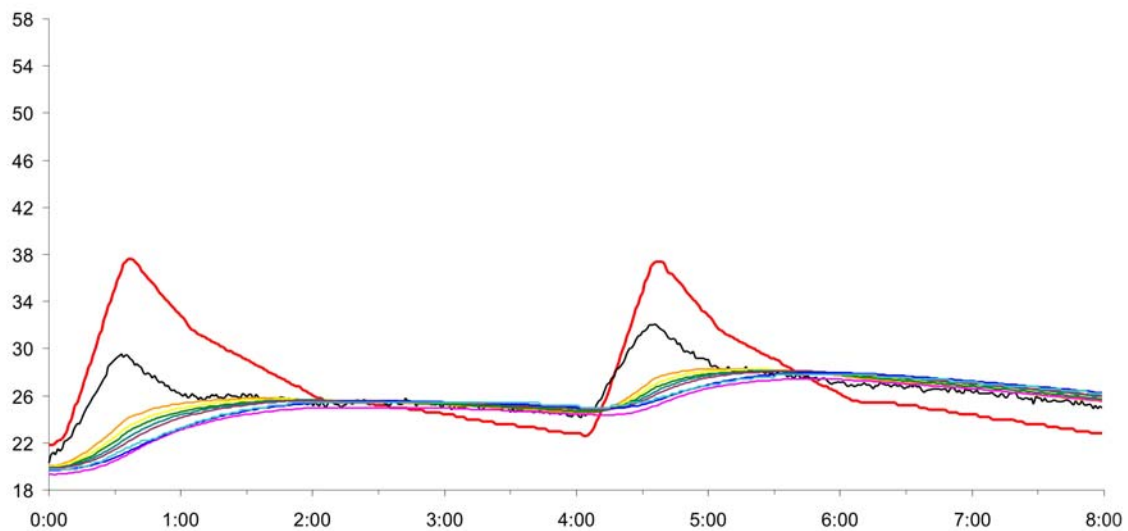
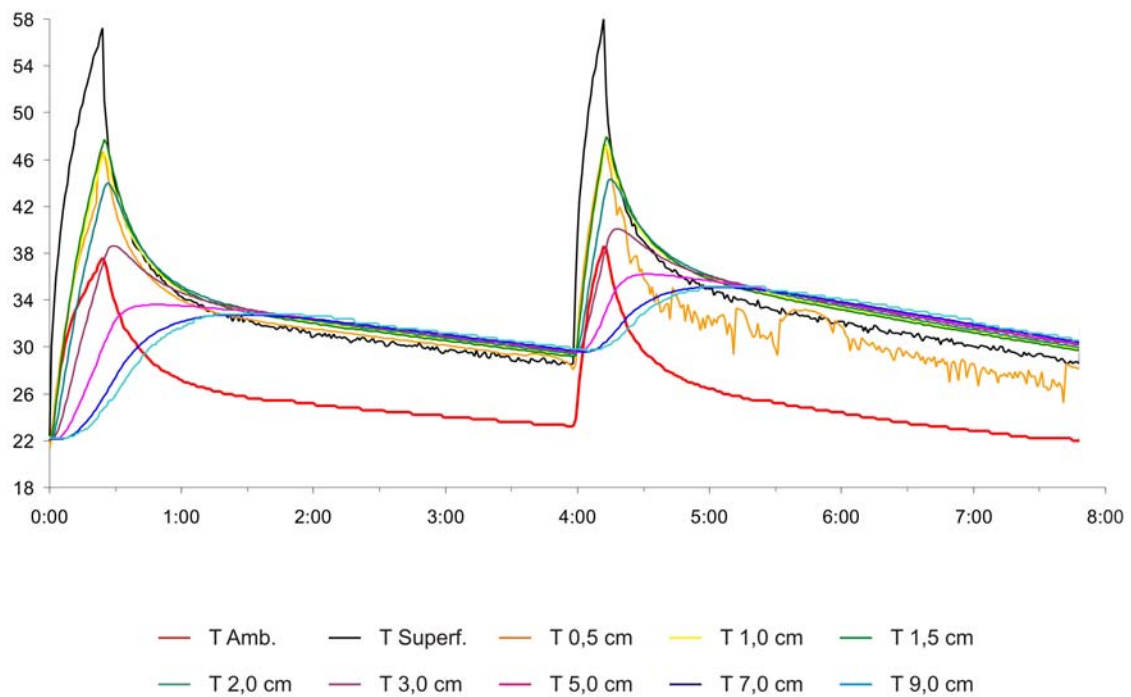
**Figura 6.15:** Evolución de las temperaturas en la *Caliza de Colmenar* a lo largo de los dos ciclos experimentales de radiación (arriba) y convección (abajo)..

Otro parámetro incluido en las tablas es el **máximo gradiente de temperatura con respecto al tiempo ( $\Delta T/\Delta t$ )** para las rampas de ascenso y descenso de la temperatura para cada uno de los ciclos. Se considera que gradientes superiores a 2 °C/minuto pueden llegar a producir fenómenos de rotura por estrés térmico en los materiales pétreos (Yatsú, 1988).

Se indica la **pendiente ( $\Delta T/\Delta x$ ) máxima** en todo el ensayo del perfil de temperaturas en las zonas más externas e internas del material. La pendiente de la distribución de temperaturas, será proporcional a los posibles efectos de tensión por dilatación diferencial de zonas adyacentes del material.



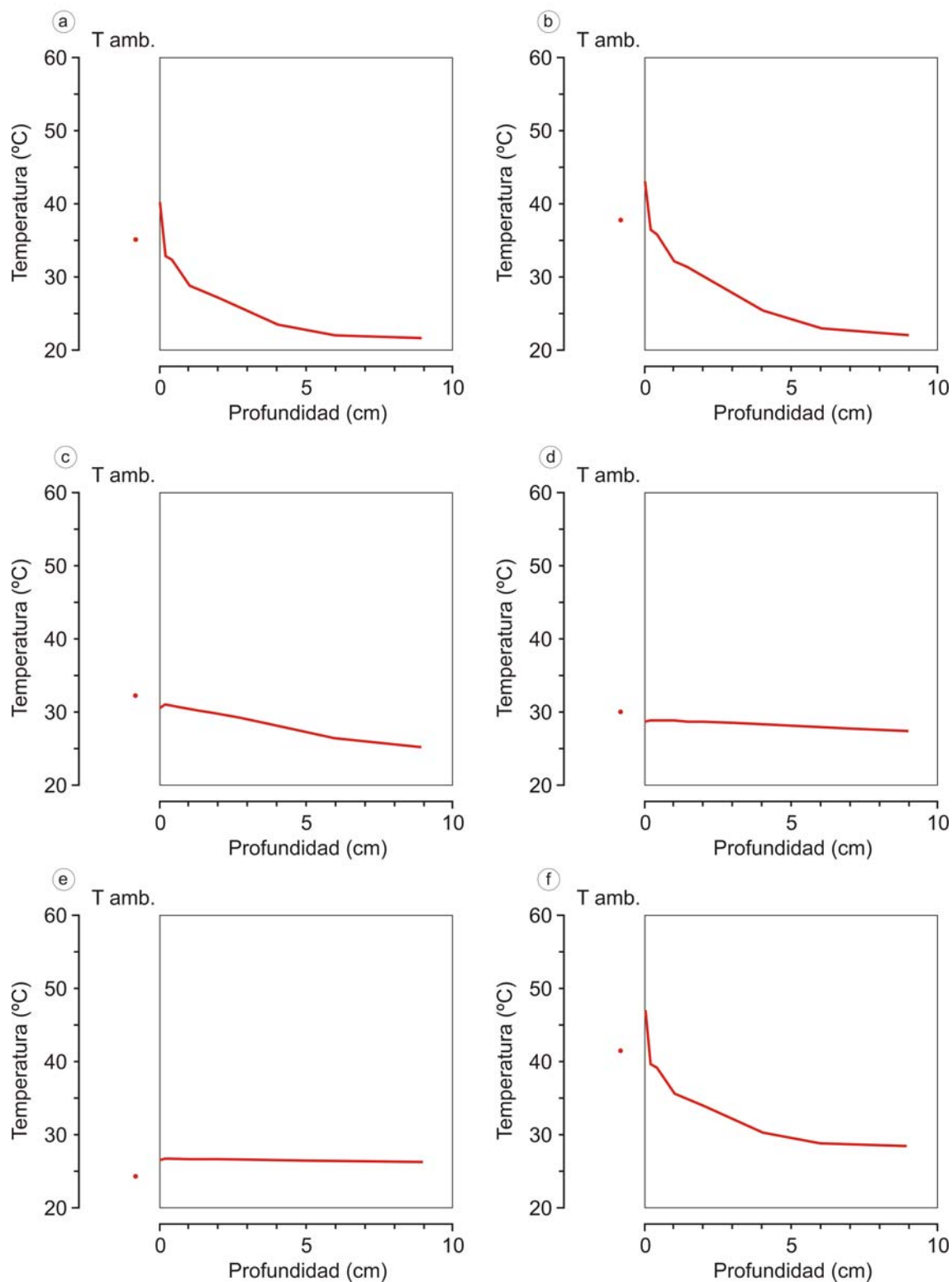
**Figura 6.16:** Evolución de las temperaturas en el *Granito Blanco Castilla* a lo largo de los dos ciclos experimentales de radiación (arriba) y convección (abajo).



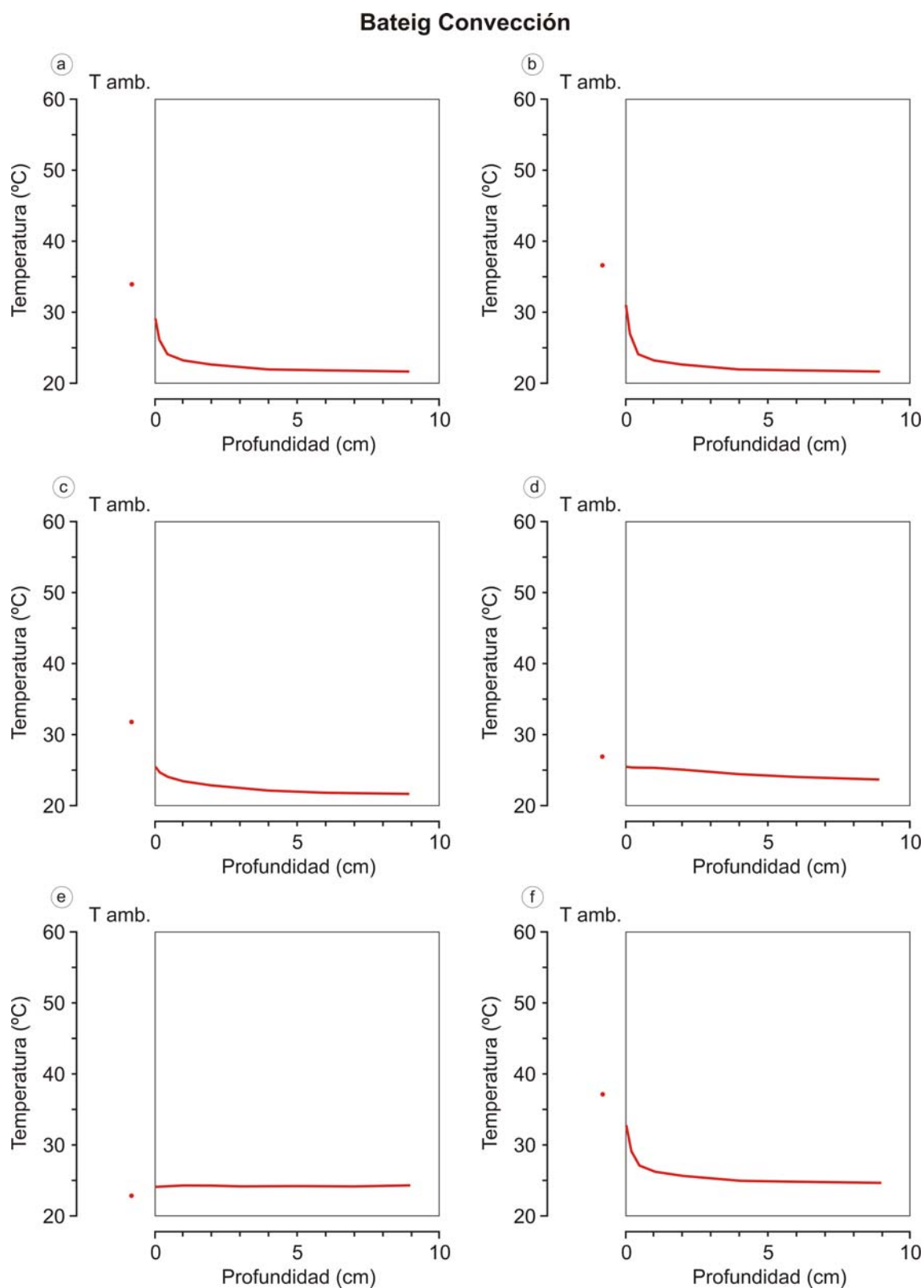
**Figura 6.17:** Evolución de las temperaturas en el *Granito Negro Ochovo* a lo largo de los dos ciclos experimentales de radiación (arriba) y convección (abajo).

El último parámetro incluido en las tablas es el **retardo**, con respecto al momento en el que se alcanza el máximo de temperatura superficial, con el que un punto en el interior del material alcanza su máximo de temperatura. Este valor va a depender principalmente de la conductividad térmica de la roca. A mayor conductividad térmica, mayor es el flujo térmico hacia el interior y más rápidamente responderá un punto del interior a los cambios exteriores de temperatura.

### Bateig Radiación

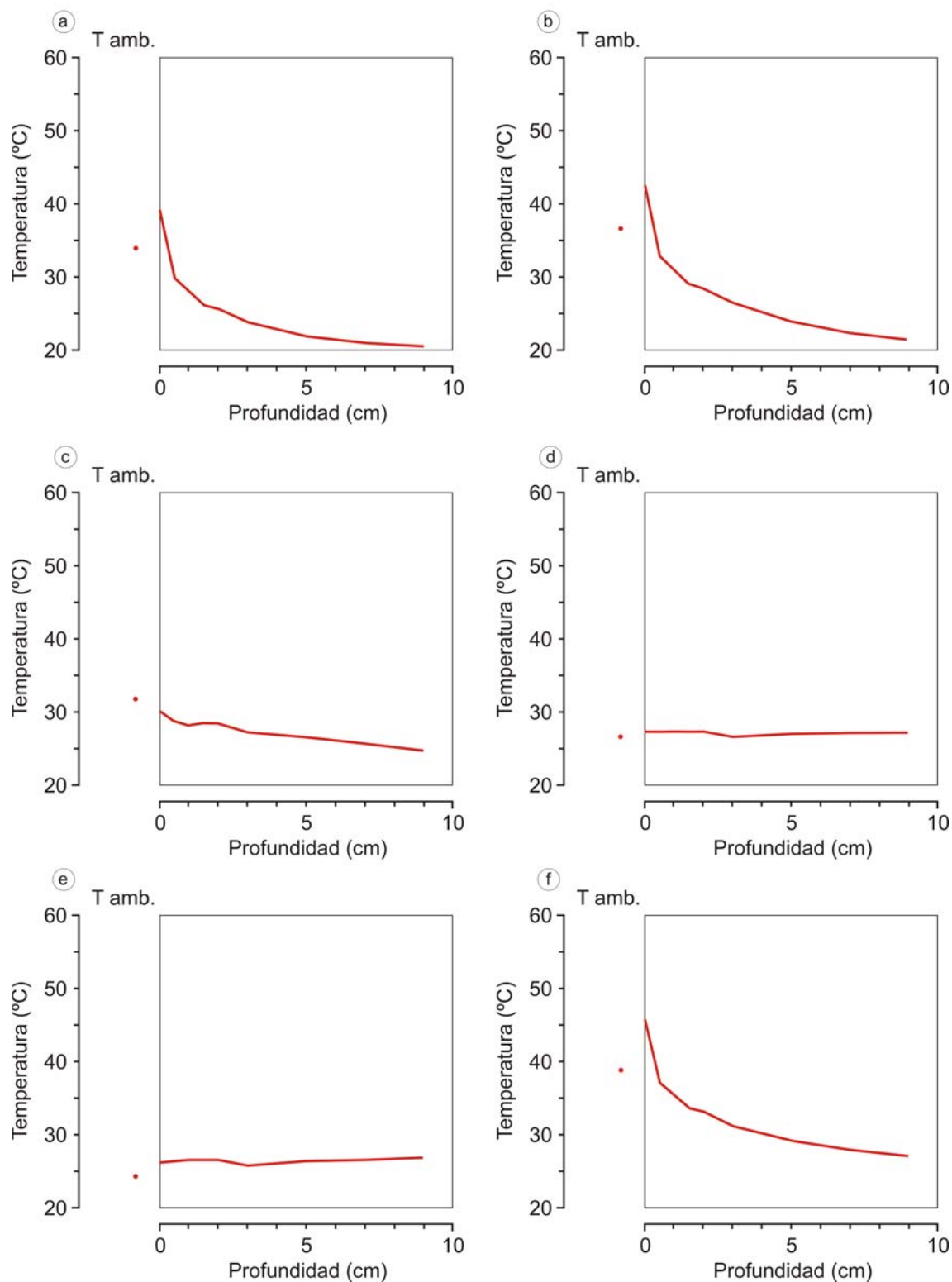


**Figura 6.18a:** Perfiles de temperaturas en *Piedra de Bateig*, ensayada en régimen de radiación, a los 15 minutos de comenzado el ciclo (a), en el máximo de temperatura superficial (b), a los 45 minutos (c), a los 120 minutos (d), en el punto final del primer ciclo (e) y en el máximo de temperatura superficial del segundo ciclo (f).

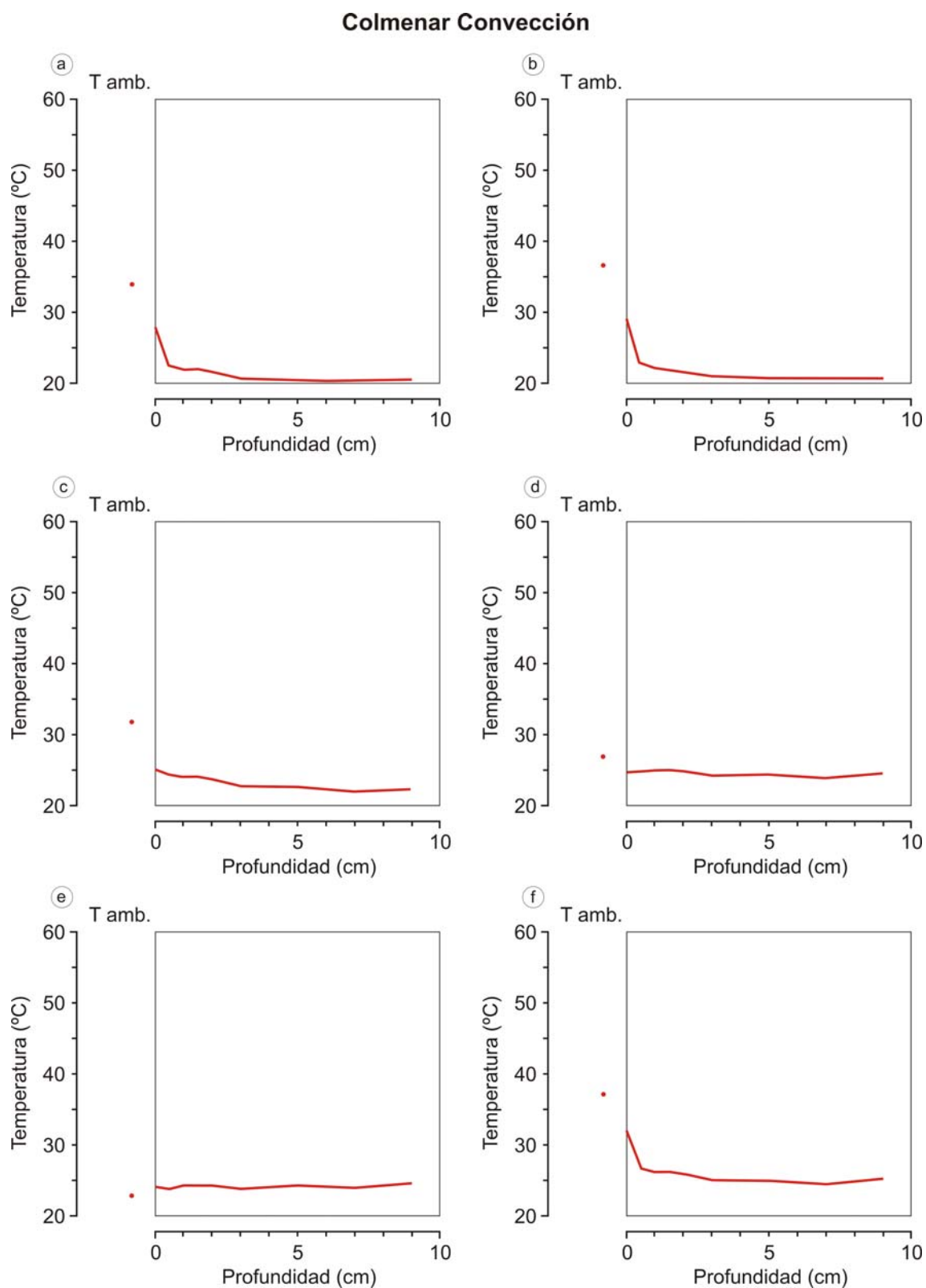


**Figura 6.18b:** Perfiles de temperaturas en *Piedra de Bateig*, ensayada en régimen de convección, en los puntos de temperatura ambiental equivalente a los ciclos de radiación.

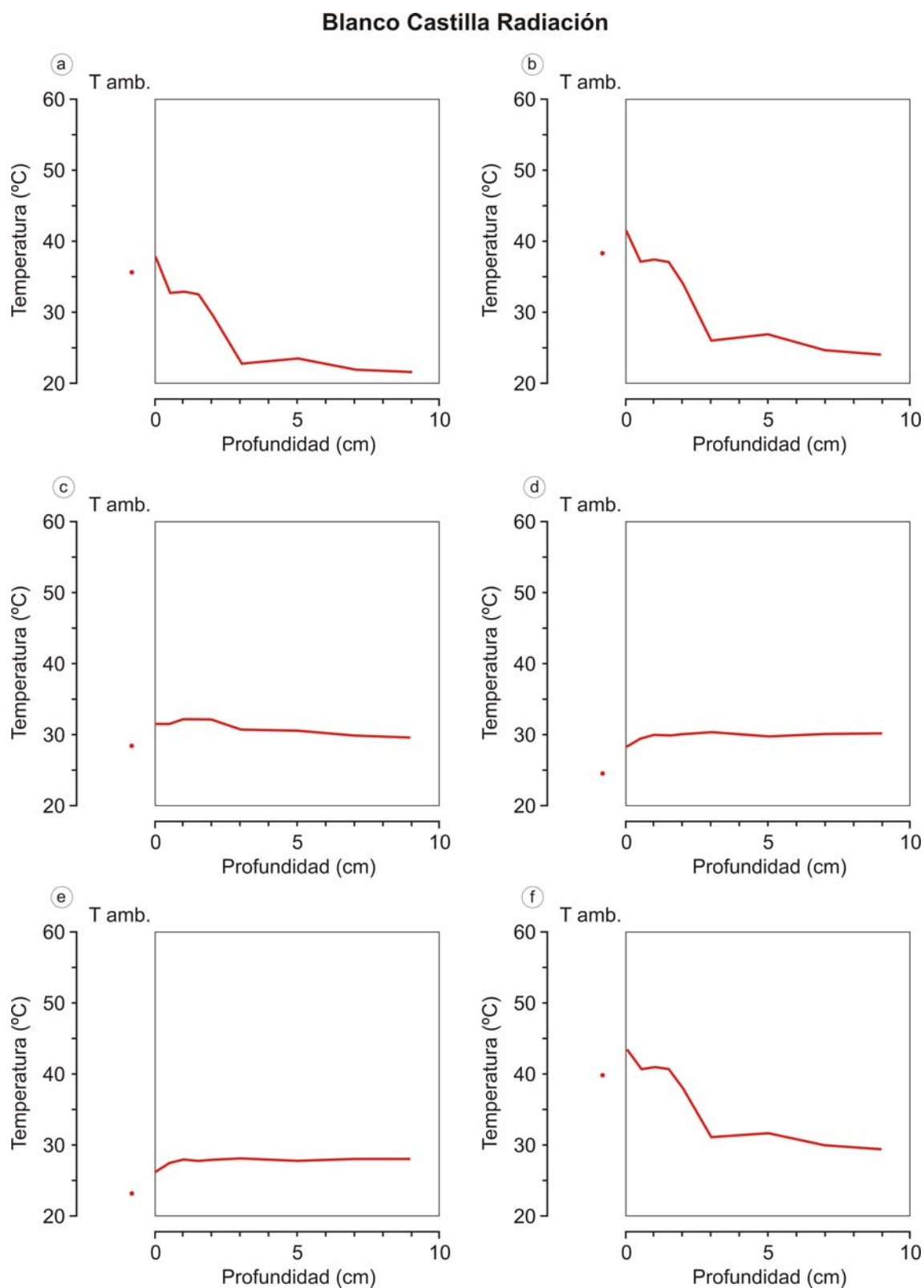
## Colmenar Radiación



**Figura 6.19a:** Perfiles de temperaturas en *Caliza de Colmenar*, ensayada en régimen de radiación, a los 15 minutos de comenzado el ciclo (a), en el máximo de temperatura superficial (b), a los 45 minutos (c), a los 120 minutos (d), en el punto final del primer ciclo (e) y en el máximo de temperatura superficial del segundo ciclo (f)

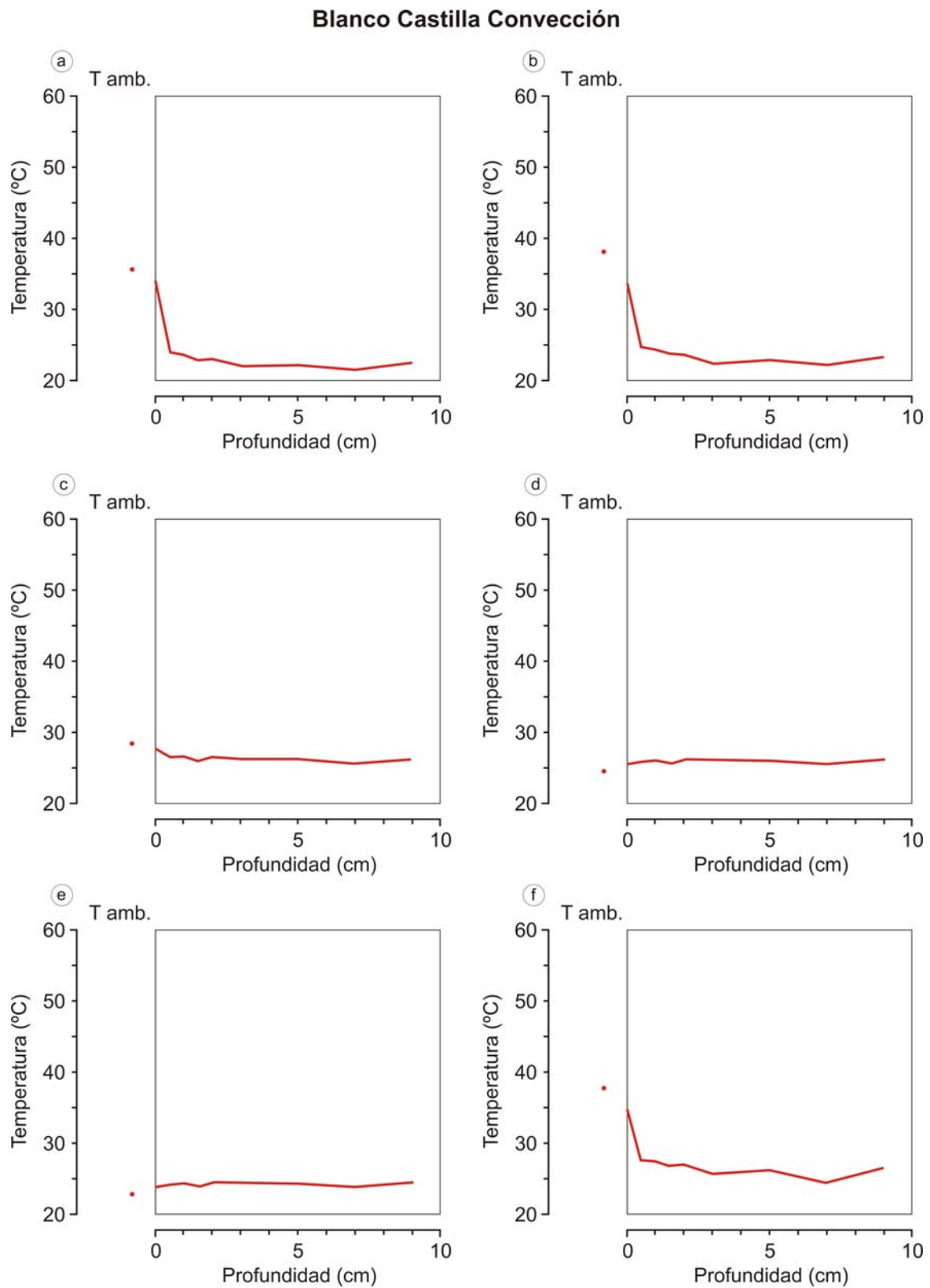


**Figura 6.19b:** Perfiles de temperaturas en *Caliza de Colmenar*, ensayada en régimen de convección, en los puntos de temperatura ambiental equivalente a los ciclos de radiación.

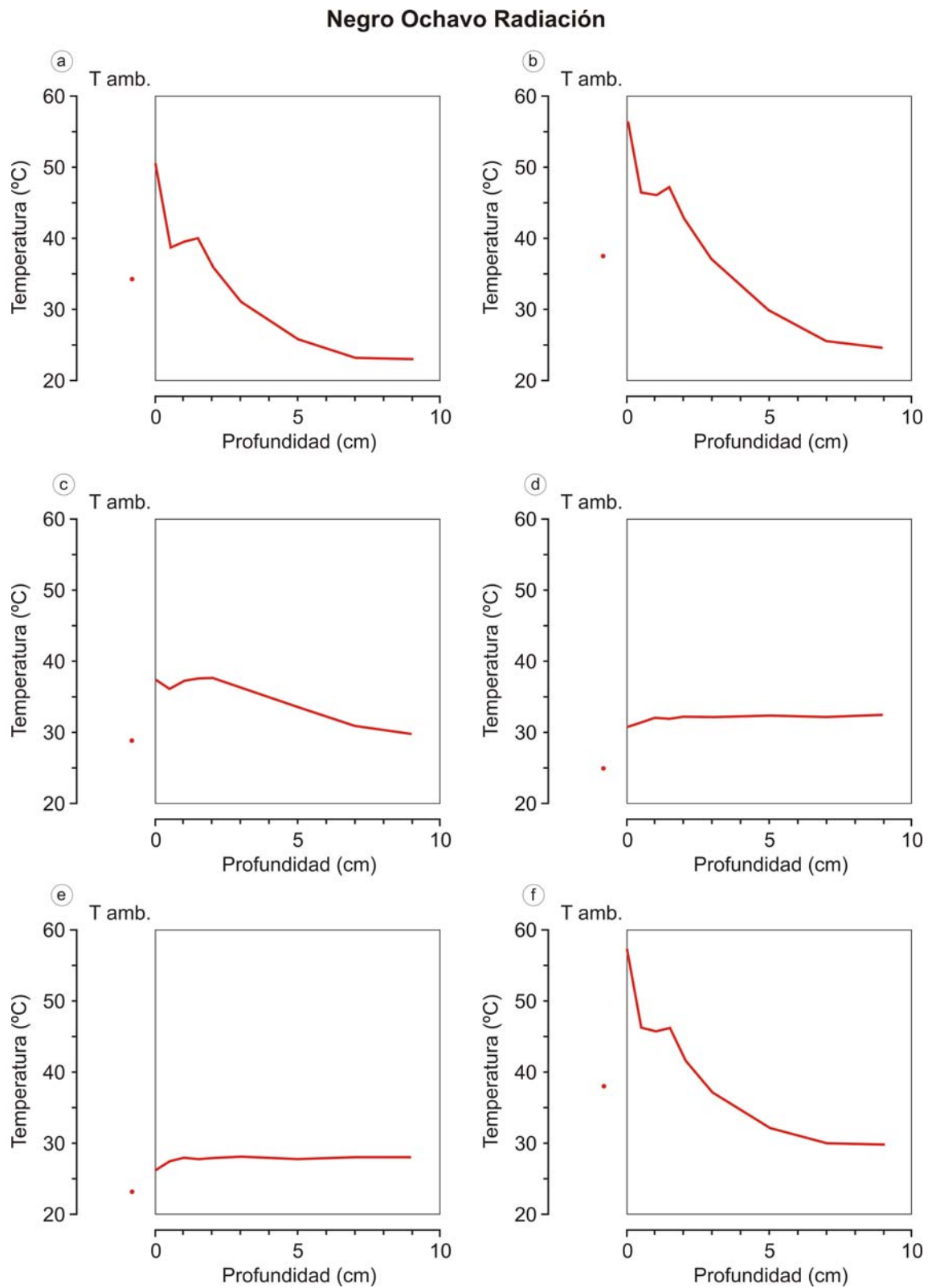


**Figura 6.20a:** Perfiles de temperaturas en *Granito Blanco Castilla*, ensayado en régimen de radiación, a los 15 minutos de comenzado el ciclo (a), en el máximo de temperatura superficial (b), a los 45 minutos (c), a los 120 minutos (d), en el punto final del primer ciclo (e) y en el máximo de temperatura superficial del segundo ciclo (f)

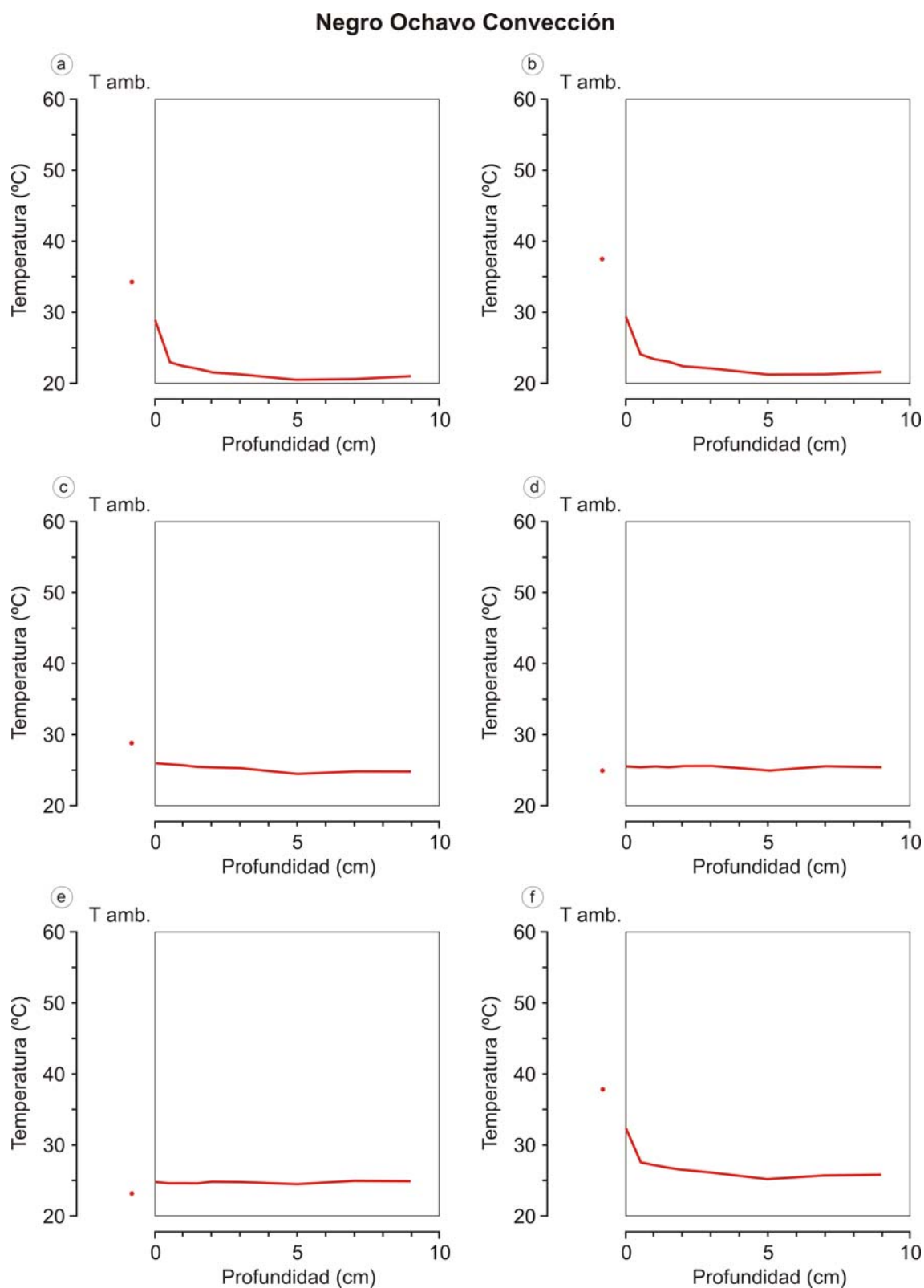




**Figura 6.20b:** Perfiles de temperaturas en *Granito Blanco Castilla*, ensayado en régimen de convección, en los puntos de temperatura ambiental equivalente a los ciclos de radiación.



**Figura 6.21a:** Perfiles de temperaturas en *Granito Negro Ochavo*, ensayado en régimen de radiación, a los 15 minutos de comenzado el ciclo (a), en el máximo de temperatura superficial (b), a los 45 minutos (c), a los 120 minutos (d), en el punto final del primer ciclo (e) y en el máximo de temperatura superficial del segundo ciclo (f).



**Figura 6.21b:** Perfiles de temperaturas en *Granito Negro Ochavo*, ensayado en régimen de convección, en los puntos de temperatura ambiental equivalente a los ciclos de radiación.

Tabla 6.3: Resumen de parámetros de los ciclos de Piedra Bateig Fantasía

		Profundidad (cm)						
		Sup	0.2	0.4	1.0	2.0	4.0	
RADIACIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	21,6	21,4	21,45	21,5	21,45	21,45
		Temperatura máxima (°C)	43,2	36,55	35,95	32,5	30,9	28,7
		Tmax – Tmin (°C)	21,6	15,15	14,5	11	9,45	7,25
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	5,4					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	4,1	1,35	1,2	0,65	0,5	0,35
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-5,9	-0,95	-0,65	-0,15	-0,1	-0,05
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	28,0	28,3	28,4	28,5	28,6	28,5
		Temperatura máxima (°C)	46,7	41,2	41,6	37,6	36,2	33,1
		T máxima – T mínima (°C)	19,2	12,8	11,8	9,0	7,0	4,9
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	6,2					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	3,6	1,2	1,2	0,5	0,5	0,4
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-6,3	-0,8	-0,7	-0,2	-0,1	-0,1
CONVECCIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Máximo ΔT/Δx (°C/mm)	3,77		0,67		0,24	
		Retardo (minutos)	0	1	1	2	4	48
		Temperatura mínima (°C)	21,5	20,4	20,6	20,6	20,7	20,6
		Temperatura máxima (°C)	29,1	26,8	30,1	27,0	28,2	26,0
		Tmax – Tmin (°C)	8,3	6,3	8,4	6,3	7,3	5,5
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-7,7					
	2 <sup>do</sup> ciclo	Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	0,4
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-1,0	-1,4	-4,6	-1,1	-0,7	-0,2
		Temperatura mínima (°C)	25,7	25,7	26,1	26,1	26,3	26,4
		Temperatura máxima (°C)	32,5	29,2	32,1	28,7	28,7	26,6
		T máxima – T mínima (°C)	7,7	3,5	3,3	2,1	1,2	0,8
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-5,7					
Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)		0,7	0,2	0,4	0,1	0,2	0,4	
Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)		-0,9	-0,2	-0,7	-0,2	-0,1	-0,1	
Máximo ΔT/Δx (°C/mm)		2,3		0,4		0,2		
Retardo (minutos)		0	54	58	73	77	100	

La respuesta del material frente al calentamiento da lugar a un perfil de temperaturas de forma exponencial, tanto en los regímenes de radiación como de convección, estribando las principales diferencias en la máxima temperatura alcanzada en cada régimen y en el alcance que los gradientes presentan en el seno del material.

El régimen de radiación genera una anisotropía térmica del material mayor que el régimen de convección. La temperatura superficial del material bajo radiación excede ampliamente la temperatura ambiente, hasta los 19,6 °C alcanzados en el *Negro Ochavo*.

El principal control sobre el valor de la temperatura superficial es el albedo de las superficies que se relaciona directamente con los parámetros cromáticos de Luminosidad ( $L^*$ ) e Índice de Blanco (WI). A mayor luminosidad e índice de blanco, mayor es el albedo de las superficies y existe una relación directamente proporcional entre albedo y máxima temperatura superficial. A menor albedo de la superficie, mayor diferencia existe entre la temperatura del material y la temperatura del aire circundante.

**Tabla 6.4:** Resumen de parámetros de los ciclos de Caliza de Colmenar

		Profundidad (cm)						
		Sup	0.5	1.0	2.0	5.0	9.0	
RADIACIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	20,2	19,9	20,0	20,0	19,7	20,0
		Temperatura máxima (°C)	42,6	33,8	29,7	29,8	27,0	27,4
		Tmax – Tmin (°C)	22,4	13,8	9,7	9,8	7,2	7,4
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	6,4					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	4,7	1,0	0,5	0,5	0,3	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-4	-0,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	26,2	26,3	26,5	26,5	26,3	26,6
		Temperatura máxima (°C)	46,1	38,1	34,4	34,5	31,6	31,6
		T máxima – T mínima (°C)	19,9	11,7	7,9	8,0	5,3	5
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	7,3					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	4,1	0,9	0,5	0,4	0,3	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-4,3	-0,5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
	Máximo ΔT/Δx (°C/mm)		1,93		0,14			
	Retardo (minutos)		0	1	3	3	71	114
CONVECCIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	20,1	19,0	19,2	19,2	19,0	19,2
		Temperatura máxima (°C)	28,7	24,8	24,9	24,8	24,6	24,8
		Tmax – Tmin (°C)	8,6	5,75	5,65	5,6	5,55	5,6
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-9,1					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,7	-0,9	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	24	23,9	24,3	24,3	24,2	24,6
		Temperatura máxima (°C)	32	27,0	26,5	26,3	25,1	25,4
		T máxima – T mínima (°C)	8	3,15	2,2	1,9	0,9	0,8
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-6,7					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,8	0,15	0,15	0,1	0,1	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
	Máximo ΔT/Δx (°C/mm)		1,20		0,15			
	Retardo (minutos)		0	54	76	78	124	101

Tabla 6.5: Resumen de parámetros de los ciclos de Granito Blanco Castilla

		Profundidad (cm)						
		Sup	0.5	1.0	2.0	5.0	9.0	
RADIACIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	20,1	19,6	19,9	19,9	19,7	19,8
		Temperatura máxima (°C)	41,5	37,9	38,4	35,5	30,6	30,8
		Tmax – Tmin (°C)	21,4	18,3	18,5	15,5	10,9	11
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	4,5					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	4,2	1,4	1,2	0,8	0,4	0,4
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-1,2	-0,7	-0,6	-0,3	-0,1	-0,2
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	26,1	27,4	27,7	27,8	27,6	28
		Temperatura máxima (°C)	43,6	41,2	41,5	39,0	34,3	33,8
		T máxima – T mínima (°C)	17,5	13,8	13,7	11,1	6,7	5,8
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	8,6					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	3,6	1,3	1,2	0,8	0,4	0,4
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-3,3	-0,7	-0,6	-0,2	-0,1	-0,4
	Máximo ΔT/Δx (°C/mm)		0,80			0,04		
	Retardo (minutos)		0	2	2	4	31	41
CONVECCIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	21,1	20,7	20,8	20,8	20,7	21
		Temperatura máxima (°C)	34,6	26,5	26,6	26,6	26,4	26,4
		Tmax – Tmin (°C)	13,5	5,85	5,8	5,7	5,6	5,4
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-3,3					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	23,8	24,9	25,0	25,1	25,0	25,4
		Temperatura máxima (°C)	35,5	27,7	27,5	27,0	26,4	26,6
		T máxima – T mínima (°C)	11,7	2,8	2,5	1,9	1,4	1,2
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-2,2					
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,9	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
	Máximo ΔT/Δx (°C/mm)		2,07			-0,04		
	Retardo (minutos)		0	59	62	74	75	65

El régimen de calentamiento por convección es menos eficaz desde el punto de vista del calentamiento de la muestra. En todas las muestras calentadas por convección la temperatura de la superficie es varios grados menor que la temperatura ambiente. Aunque este régimen genera una anisotropía térmica del material, esta es mucho menor que en los casos equivalentes de muestras calentadas por radiación. Aun así, existen diferencias entre los distintos materiales, por lo que la afirmación de que las diferencias entre las litologías se anulan (Warke y Smith, 1998) no es completamente cierta para el

caso de un calentamiento cíclico, como es este caso. Sin embargo, de acuerdo con lo introducido por McGreevy (1985), cuando el modo de calentamiento es por convección se elimina la acción de las propiedades físicas de la roca relacionadas con la absorción de una radiación electromagnética, como por ejemplo el albedo. Así, al observar las máximas temperaturas alcanzadas en la superficie de los materiales en los regímenes de convección no se observa correlación con el albedo.

**Tabla 6.6:** Resumen de parámetros de los ciclos de Granito Negro Ochavo

		Profundidad (cm)							
		Sup	0.5	1.0	2.0	5.0	9.0		
RADIACIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	22,4	21,3	22,1	22,2	22,1	22,2	
		Temperatura máxima (°C)	57,2	46,6	46,6	44,0	33,6	33,0	
		Tmax – Tmin (°C)	34,8	25,3	24,4	21,8	11,4	10,8	
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	19,6						
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	7,6	3,2	1,6	1,1	0,5	0,4	
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-6,2	-1,2	-0,7	-0,4	-0,1	-0,4	
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	37,2	31,1	30,7	29,6	29,6	29,6	
		Temperatura máxima (°C)	58,1	47,3	47,2	44,3	36,2	34,0	
		T máxima – T mínima (°C)	20,9	16,2	16,4	14,7	6,6	4,4	
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	19,9						
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	7,9	4,0	1,7	1,2	0,4	0,4	
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-6,6	-2,1	-0,7	-0,4	-0,1	-0,4	
		Máximo ΔT/Δx (°C/mm)	2,63		0,36				
		Retardo (minutos)	0	2	3	4	24	67	
CONVECCIÓN	1 <sup>er</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	20,3	20,1	20	19,9	19,3	19,8	
		Temperatura máxima (°C)	29,6	25,8	25,7	25,6	25,0	25,4	
		Tmax – Tmin (°C)	9,3	5,7	5,7	5,7	5,7	5,6	
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-8,8						
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,8	0,2	0,2	0,15	0,1	0,2	
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	
	2 <sup>do</sup> ciclo	Temperatura mínima (°C)	24,1	24,5	24,6	24,8	24,3	25	
		Temperatura máxima (°C)	32,1	27,7	27,2	26,6	25,4	26	
		T máxima – T mínima (°C)	8,0	3,2	2,6	1,8	1,0	1,0	
		Máximo Tsup – Tamb (°C)	-5,8						
		Máximo ΔT/Δt calentamiento (°C/min)	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	
		Máximo ΔT/Δt enfriamiento (°C/min)	-0,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	
				Máximo ΔT/Δx (°C/mm)	1,19		0,06		
				Retardo (minutos)	0	55	70	79	94

Además de la temperatura superficial, que es reflejo de la cantidad de calor absorbida por la muestra, la conductividad térmica es el segundo factor influyente en la respuesta de los materiales, pues condiciona el flujo de calor a las zonas más internas.

La conductividad térmica se refleja en los perfiles en los gradientes  $\Delta T/\Delta t$  y  $\Delta T/\Delta x$ . Cuanto mayor es la conductividad térmica, mayor es el flujo térmico y los  $\Delta T/\Delta t$  y  $\Delta T/\Delta x$  menores. En general, las rocas graníticas presentan una mayor conductividad ( $2,7 \pm 1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) y por tanto unos gradientes menores que las rocas calizas ( $1,6 \pm 1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ; a partir de datos de Cermák y Rybach, 1982; Hodgman, 1961;) estos valores de conductividad son la media de una recopilación de datos de diferentes materiales a partir de diversos autores). La temperatura mínima alcanzada en los ciclos refleja también la conductividad térmica del material, pues cuanto mayores son las temperaturas mínimas en el interior del material, más efectivo ha sido el transporte de calor hacia el interior del material.

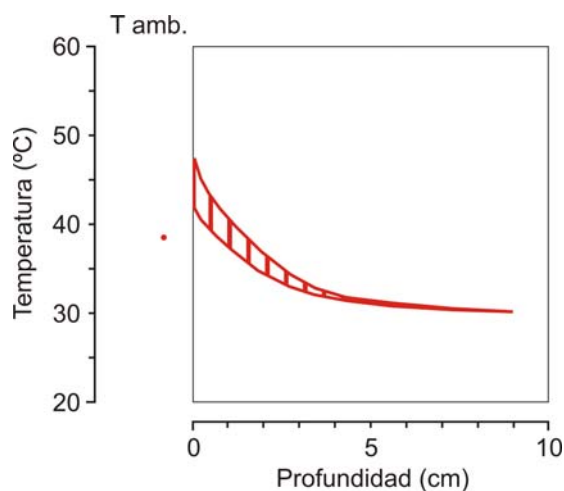
El material más conductor de los estudiados es el granito *Blanco Castilla*, seguido de la *Caliza de Colmenar*, donde concurren los índices más bajos de  $\Delta T/\Delta t$  y  $\Delta T/\Delta x$ , siendo por el contrario los menos conductores la *Piedra de Bateig* y el *Negro Ochavo*. Existen dos factores que influyen en estas diferencias en los gradientes, y por tanto en la conductividad térmica. Por un lado se encuentra el factor composicional; el cuarzo tiene los valores más altos de conductividad térmica entre los minerales formadores de estas rocas:  $12,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  para la dirección paralela al eje c y  $5,96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  para la perpendicular (Cermák y Ryback, 1982) frente a ortosa ( $2,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), biotita ( $1,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), hornblenda ( $2,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), ortopiroxeno (enstatita,  $4,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), plagioclasa ( $1,68 - 2,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) o calcita ( $3,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) (Cermák y Ryback, 1982). Así, la conductividad de una roca ígnea ácida como es el granito *Blanco Castilla*, es notablemente mayor que la del resto de materiales.

Aparte del factor composicional, se encuentra el factor textural; la porosidad en una roca no saturada de agua se puede suponer como relleno de aire, lo que influye negativamente en la conductividad térmica de los materiales. Así, la *Piedra de Bateig*, una roca calcárea muy porosa, es coincidentemente la que valores más altos de los gradientes  $\Delta T/\Delta t$  y  $\Delta T/\Delta x$ , y por tanto los valores más bajos de conductividad térmica, mientras que otro material calcáreo, como la *Caliza de Colmenar*, presenta en virtud de su baja porosidad una mayor conductividad térmica si la comparamos, por ejemplo, con



el *Negro Ochavo*. En este caso, el factor composicional es predominante, dado que la conductividad de la calcita ( $3,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) es mayor que la de la mayoría de los principales minerales formadores de esta roca ígnea básica: hornblenda ( $2,85 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), biotita ( $1,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), ortopiroxeno (enstatita,  $4,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) y plagioclasa ( $1,68 - 2,31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

En las rocas de mayor conductividad térmica, como el granito *Blanco Castilla*, los perfiles de distribución de temperatura presentan un aspecto sigmoidal frente al decrecimiento exponencial simple de los materiales de menor conductividad, debido a que al aumentar la conductividad térmica, el flujo de calor hacia el interior es mayor y mayor el espesor de zona “sobrecalentada” durante los ciclos. Este espesor donde se producen los cambios de temperatura más intensos no supera en ningún los 3 cm. (véase también la figura 6.24 que ilustra los ciclos de corto rango en el *Negro Ochavo*).



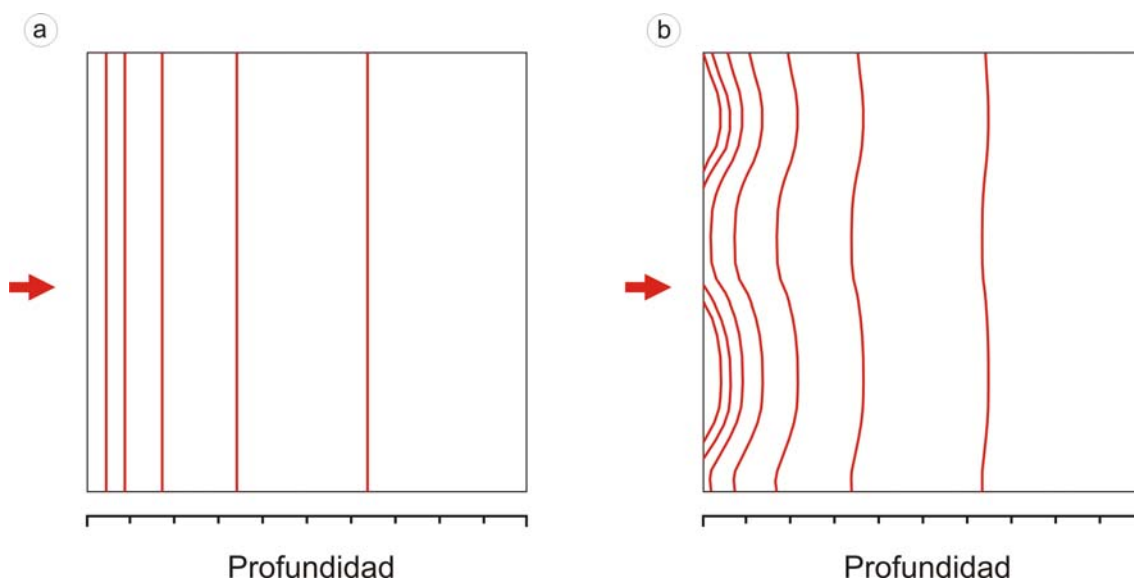
**Figura 6.22:** Debido a que las rocas son materiales heterogéneos, no existe un perfil único de temperaturas en el seno del material sino que se superponen una serie de gradientes dando lugar a una suma de perfiles en la zona más superficial del material.

En estos primeros 3 cm de material se observan en los perfiles respuestas “anómalas”, en las que un sensor más profundo mide una temperatura mayor que un sensor más somero. Si consideramos un medio homogéneo, esta distribución de temperaturas como la que se observa en las figuras 6.20a y 6.21a, correspondientes a *Blanco Castilla* y *Negro Ochavo*, sería ilógica. Sin embargo, estos materiales están formados por diversos minerales con propiedades térmicas muy diferentes. A las

mencionadas diferencias de conductividad térmica se suman las diferencias de albedo o de capacidad calorífica entre cada uno de los minerales, como se discutirá en el siguiente capítulo. Esto da lugar a materiales muy heterogéneos desde el punto de vista térmico y en los que no se puede considerar un perfil único de distribución de temperaturas en el seno del material, pues el flujo térmico va a variar de un punto a otro de la roca dependiendo de la composición mineralógica de la “trayectoria” del flujo de calor.

Así, como se observa en la figura 6.22, un único perfil de temperaturas no puede caracterizar a un material heterogéneo, sino más bien una familia de perfiles que daría lugar a un intervalo de temperaturas posibles para una profundidad dada en vez de una temperatura única. Puesto que los sensores de temperatura están colocados en una disposición espiral, un sensor situado a mayor profundidad puede recoger una temperatura más alta que un sensor más somero. Estas anomalías no se dan sin embargo en litologías más homogéneas desde el punto de vista composicional como son las calizas estudiadas.

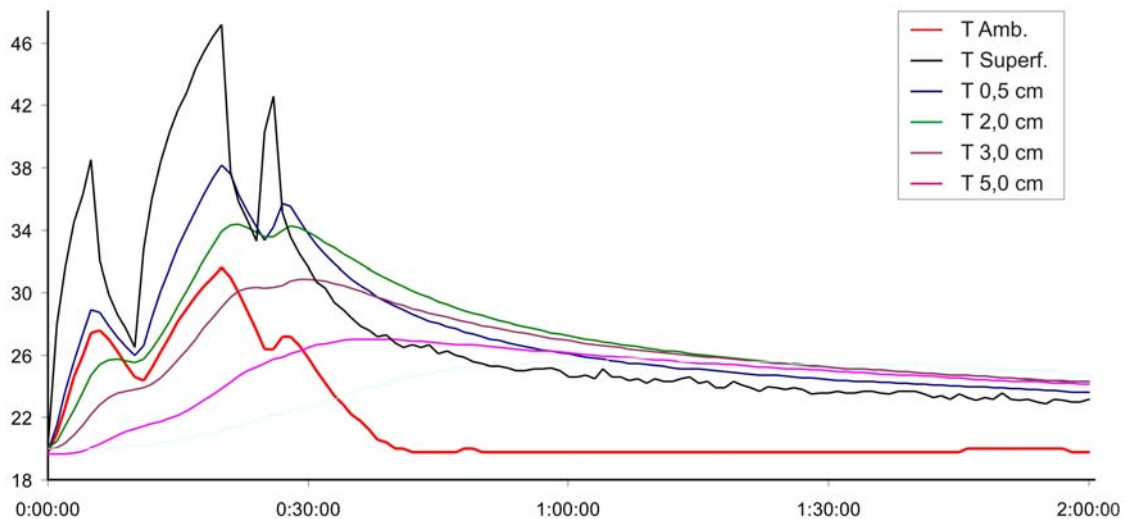
Así hay que pensar que en las rocas heterogéneas existe una variabilidad de la temperatura para cada profundidad dada. De tal forma, las isotermas de estos materiales no quedarían definidas como planos paralelos a la superficie calentada (Figura 6.23a) sino como superficies curvas subparalelas a la cara calentada (Figura 6.23b). Este último modelo no es consonante con el modelo clásico supuesto para explicar la creación de desplazados térmicos y ejemplificado por el modelo de Hall y Hall (1991) representado al principio del capítulo (Figura 6.1).



**Figura 6.23:** Modelo esquemático de la distribución de isotermas durante el calentamiento de un material. La figura *a* correspondería a un material homogéneo, mientras que la *b* supondría un material heterogéneo como pueden ser la mayoría de rocas ígneas.

Este modelo de superficies curvas reduce la importancia relativa de los esfuerzos de cizalla y tensión paralelos a la superficie, que son el mecanismo propuesto para la

formación de desplazados térmicos, para aumentar la importancia de un campo tridimensional de esfuerzos en la zona más externa de la roca, que haría más probable que se produjeran procesos de deterioro no direccionales, como podría ser la disgregación granular.



**Figura 6.24:** Evolución de las temperaturas en un ensayo de ciclos de corto rango en Negro Ochavo. La respuesta del material a estos ciclos se ve fuertemente atenuada para profundidades a partir de 2 cm.

El modelo de isotermas paralelas podría ser aplicable en los materiales heterogéneos en zonas más profundas, debido a que el ambiente mineral a través del cual circula el flujo de calor hacia el interior sería ya estadísticamente igual. Sin embargo, en estas zonas la probabilidad de que se produzcan fenómenos de termoclastia es mucho más limitada.

Aparte de los ciclos diurnos de cambio de temperatura, existen fluctuaciones de menor rango, que en ambientes naturales pueden deberse al viento o la nubosidad. Las fluctuaciones de mayor rango penetran más profundamente en la roca y tienen velocidades de cambio menores, lo que permite a la roca alcanzar estadios progresivos de equilibrio sin connotaciones dinámicas importantes. Por otro lado, cuanto más cortas son las fluctuaciones térmicas, menor es la profundidad de penetración de las ondas térmicas en el material. De esta manera, los primeros milímetros de material están sujetos a muchos más eventos de estrés térmico que las zonas internas.

La figura 6.24 muestra la respuesta de la diorita *Negro Ocho* a un ensayo que modela una serie de ciclos de corta duración sobreimpuestos a un ciclo de aumento y descenso de temperatura de mayor rango. Sólo en las zonas más externas el material responde con cambios apreciables de temperatura a estos ciclos.

En el interior de la muestra, la respuesta al calentamiento presenta un retardo frente al superficial. Así, mientras que la temperatura de la superficie va descendiendo, la temperatura en el interior aun se mantiene en la zona ascendente del ciclo de subida y bajada de la temperatura. Como se observa en los gráficos de las figuras 6.18 a 6.21 durante la rampa de subida de la temperatura ambiente, los valores para la superficie de la piedra son ostensiblemente mayores que los exteriores y que los interiores, mientras que durante el enfriamiento los valores en el interior del material son mayores que en la superficie.

Todo esto indica que la zona susceptible de sufrir efectos dinámicos debidos a la temperatura esta reducida al primer par de centímetros desde la superficie, donde resulta más realista el modelo de superficies curvas, que supone un campo de esfuerzos tridimensional, que el modelo en “rodajas” que tiene en cuenta isotermas planas y paralelas a la superficie.

Según todo lo anterior, los materiales más susceptibles a generar formas de deterioro planas debidas a la meteorización por insolación serían las rocas calcáreas oscuras y muy porosas, donde concurren los menores valores de conductividad térmica, mayor absorción de calor y homogeneidad que daría lugar a isotermas paralelas a la superficie. Las litologías menos susceptibles serían por el contrario rocas leucograníticas muy ácidas. Sin embargo, en una roca calcárea muy porosa, la probabilidad de que se produzcan formas planas de deterioro debido a fenómenos hídricos es tan superior a la probabilidad de que se produzcan formas de deterioro térmico, que la influencia directa que los cambios de temperatura pudieran tener como agente de deterioro único en un eventual desplazado es despreciable.

Por otro lado, en rocas heterogéneas y poco porosas como las rocas ígneas granudas, es, según lo expuesto, más probable que se genere una forma de deterioro no direccional (p.ej. disgregación granular), que una forma plana como un desplazado. El siguiente capítulo estudiará las implicaciones que la heterogeneidad de estos materiales puede tener en la disgregación granular.

#### **6.4. Ensayos de envejecimiento térmico acelerado en régimen de radiación.**

La generación de formas de deterioro térmico en un ensayo de envejecimiento en laboratorio, en un periodo de tiempo prudencial, es una condición necesaria para que la meteorización por insolación sea un parámetro evaluable y cuantificable y pueda tenerse en cuenta a priori para, por ejemplo, la selección de material para una obra nueva.

Desgraciadamente, los ensayos de envejecimiento acelerado por insolación que se realizaron en muestras de los cuatro materiales tuvieron unos resultados muy negativos. Después de 600 ciclos experimentales (correspondientes a 100 días de funcionamiento de la cámara automática de insolación) sobre cada material, no se registraron pérdidas de ni se observaron cambios apreciables en los parámetros petrofísicos medidos. El alto coste de tiempo y la inexistencia de resultados hace inviable pensar en un ensayo adecuado a intereses comerciales o científicos a corto plazo para la determinación de la resistencia a la meteorización por insolación basada en regímenes realistas de temperatura.

Debido a esta ineficacia desde el punto de vista industrial de los ensayos de envejecimiento por insolación en laboratorio, se deben buscar alternativas a estos métodos de ensayo. Los modelos numéricos del tipo Modelización de Elementos Finitos (FEM) se han empleado con éxito para el estudio de la degradación térmica de aplacados de mármol sometidos a grandes incrementos de temperatura (Weiss et al., 2002, 2003, 2004). Hasta la fecha se ha utilizado el mármol debido a que, al ser monomineral, la simulación numérica se simplifica. Sin embargo este método sería aplicable a cualquier tipo de roca, no solo en aplacados, sino también en sillares. De esta manera a partir de las propiedades térmicas y mecánicas de los diferentes minerales de un material pétreo se puede generar un ensayo “virtual” de meteorización por insolación.

## **7. Distribución superficial de temperaturas en regímenes de radiación: implicaciones para la generación de disgregación granular.**

Las diferencias de dilatación térmica entre granos minerales en la superficie de un material pétreo bajo insolación se han asumido previamente como causante de deterioro en los materiales pétreos a través de procesos de disgregación granular. Sin embargo, no ha habido demostraciones definitivas sobre la eficacia de este mecanismo de deterioro, y ni siquiera estudios sobre las diferencias de temperatura que distintos granos minerales de un mismo material pueden alcanzar en un régimen de calentamiento por radiación.

Como se citaba en el capítulo anterior, hasta la fecha, la mayoría de experimentos y especulaciones sobre meteorización por insolación se han limitado a evaluar su potencial para generar estructuras de deterioro planas de espesor considerable (del tipo desplacado), que se asemejarían a las producidas en determinados materiales pétreos durante un fuego. Los resultados expuestos anteriormente muestran que el muestreo de temperaturas en un perfil de roca se realiza con menores espaciados y las temperaturas se miden a profundidades pequeñas, los gradientes de temperatura más intensos se reducen a los primeros milímetros de material en vez de a los “centímetros exteriores de roca” (Peel, 1974). Por ello, es importante que cualquier estudio de meteorización por insolación se concentre en la naturaleza de los gradientes en esta zona externa, que es por otro lado equivalente a la dimensión de muchos granos minerales y, por tanto, la zona de la disgregación granular.

La diferencia de temperaturas entre minerales magnificaría las diferencias de dilatación térmica, siendo así más susceptibles a esfuerzos repetidos que podrían generar la disgregación del material a través de fenómenos de fatiga. Cuanto más frecuentes fuesen estas fluctuaciones térmicas, más efectivos serían estos procesos de fatiga. Dejando de lado la influencia que puede tener la insolación en otros procesos de deterioro (por ejemplo, la cristalización de sales que se discutirá en el capítulo siguiente), si consideramos que el deterioro térmicamente inducido puede ser dominante en determinado caso, será mas probable que ocurra a la escala en la cual se expresen sus efectos más extremos, es decir, a la escala de disgregación granular, o como mucho

“microdesplacados” (formas de deterioro planares con un espesor máximo de unas pocas líneas de granos). A esta escala se ha indicado que las diferencias de temperaturas entre minerales pueden tener mayor importancia para el control de efectos como la disgregación granular que los gradientes de temperatura entre superficie y sub-superficie (Hall y André, 2003).



**Figura 7.1:** Disgregación granular en un sillar granítico (fotografía cortesía de Prof. B. Smith.)

La disgregación granular es el proceso por el cual los granos individuales se separan del conjunto de la roca debido a los esfuerzos y tensiones localizadas en las uniones intergranulares, mucho más débiles que las uniones intragranulares. Este mecanismo de deterioro es ampliamente reconocible tanto en ambientes cálidos como fríos y es especialmente importante en

el patrimonio cultural construido en piedra pues, aunque puede no afectar estructuralmente a las sillerías, tiene un impacto importante en las características superficiales que, especialmente en elementos tallados y/o pintados, es donde se centra la mayor parte del valor artístico de las obras (Camuffo, 1998).

Los bordes de grano son planos de debilidad dentro de la roca con una energía de resistencia a la fractura que ha sido tomada típicamente por diversos autores (Yang et al., 1990; Sridhar et al., 1994; Zimmermann et al., 2001; Weiss et al., 2002) como 0,4 veces la resistencia a la fractura de conjunto en los granos. Cualquier material pétreo utilizado en construcción posee una historia de esfuerzos heredados, como los impuestos por la cristalización o la tectónica, que originan microfracturas (Migon y Thomas, 2002), que las diferencias en la dilatación térmica de los granos minerales pueden aprovechar para generar nuevas fracturas intra e intergranulares (Yatsu, 1988; Migon y Thomas, 2002). A la herencia de esfuerzos que proviene de causa naturales se suman los esfuerzos residuales generados por los procesos industriales de extracción, corte o acabado que el material ha sufrido antes de su emplazamiento en el edificio.

En los casos concernientes a los regímenes de temperatura ambientales, la fracturación del material no estaría causada por un único episodio de choque térmico, sino que tardaría mucho tiempo en manifestarse y el deterioro mecánico del material

solo a través de fenómenos de fatiga después de repetidos esfuerzos (Aires-Barros et al., 1975; Yatsu, 1988; Bernardi y Vincenzi, 1993; Warke y Smith, 1994; Halsey et al., 1998). Como ejemplo de esta lentitud del proceso, estudios recientes sobre edificios en climas áridos y semiáridos que han relacionado el proceso de disgregación granular con el grado de insolación (Paradise, 1999; Sancho et al., 2003) han establecido tasas históricas de retroceso de las superficies de los sillares en el rango de 0,5 a 8,4 mm/100 años, lo que destaca la inherente lentitud del proceso.

Con todo esto, hasta la fecha las diferencias en las propiedades y temperaturas entre diferentes granos minerales se ha asumido como una causa de disgregación granular, pero las referencias analíticas al respecto son inexistentes.

Además del factor principal que supone la cantidad de energía incidente, existen otros factores ya mencionados que controlan las temperaturas absolutas y los regímenes de temperatura en superficie. Ya se ha mencionado como el albedo se ha constatado como uno de los factores con más influencia en las temperaturas de superficie (Kelly y Zumberge, 1961; Peel, 1974; Kerr et al., 1984), aunque permanece la cuestión de hasta que punto las diferencias de temperatura a escala granular se producen como resultado de diferencias de albedo (Hall y André, 2003). La capacidad calorífica así como la conductividad térmica son otros factores que se han mencionado como influyentes en la temperatura de superficie (McGreevy, 1985; Jenkins y Smith, 1990; McGreevy et al., 2000). Sin embargo, estos factores han recibido poca, si no ninguna, atención en los estudios experimentales. De igual manera no se habían estudiado las relaciones entre tamaño de grano y temperatura, aunque sea posible suponer que cuanto más grueso es el grano de una roca, mayor serán las superficies expuestas a la radiación y a la vez mayor es la masa térmica a tener en cuenta. Así mismo, la dilatación térmica es directamente proporcional a la longitud inicial del grano, por tanto es claramente importante estudiar las relaciones entre temperatura y tamaño, especialmente si se tiene en cuenta que ha sido ampliamente reconocido que las rocas granítica de grano grueso sufren con mayor intensidad procesos de disgregación granular como principal mecanismo de deterioro (Cooke y Warren, 1973; Ollier, 1984; Warke y Smith, 1994; Hall y André, 2003).

A la luz de estas consideraciones en este capítulo se identificará la existencia de diferencias de temperaturas en la superficie de una serie de rocas granudas en función del color de los minerales (como función del albedo) y el tamaño de los granos (como



función de la masa térmica), bajo condiciones de insolación simuladas en laboratorio en un rango de diferentes temperaturas de fondo, con la principal intención de discriminar el potencial que las diferencias de temperatura entre granos pudiera tener como agente de deterioro de los materiales pétreos.

### **7.1. Materiales y Métodos.**

Dado que la disgregación granular afecta principalmente a los materiales heterogéneos, se escogieron cuatro tipos de litologías graníticas en el rango de diorita a leucogranito. Las muestras de roca eran bloques de cantera de 12 x 12 x 10 cm. Estos materiales se seleccionaron por su frecuente utilización tanto en edificios históricos como de nueva construcción y por sus diferentes tamaños de grano y albedo total (fruto de las diferentes proporciones de cuarzo, feldespatos y minerales máficos), lo que permitía estudiar la influencia de los diferentes tamaños de grano y albedos, tanto de los minerales estudiados como del “ambiente mineral” circundante. En cada uno de los materiales, excepto en la diorita se escogieron tres minerales para medir sus temperaturas superficiales en cada uno de los ciclos de temperaturas ambientales. En cada muestra se seleccionó un cristal de cuarzo, uno de feldespato y una mica biotita. El carácter básico de la diorita hizo imposible la selección de un grano de cuarzo adecuado para las mediciones.

Se estudiaron las muestras con microscopio óptico de polarización (Zeiss Axioskop) y se clasificaron según los criterios de Streckeisen (1976). Para determinar el tamaño y área de cada uno de los minerales seleccionados se utilizó un programa de análisis de imagen (UTHSCSA Image Tool 2.00 software). Las medidas colorimétricas se llevaron a cabo con un espectrofotómetro (MINOLTA CM-2002), modificándose la ventana de medida del aparato reduciéndola a un diámetro de 5,5 mm. Debido a esta reducción de la ventana, se tuvo que realizar un recalibrado del aparato para correlacionar los valores obtenidos por este sistema con los valores reales de color.

Se seleccionaron dos parámetros entre los varios que definen el color, como los más directamente relacionados con el albedo de las superficies: La luminosidad ( $L^*$ ) según

la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, 1986) y el índice de blanco (WI) según la ASTM E313 (American Society for Testing and Materials, 2000). Ambos parámetros se obtienen de los valores de reflectancia de determinadas longitudes de onda, por lo que se pueden relacionar con el albedo. El albedo o *reflectancia normal*, como se ha definido en los capítulos introductorios, es la medida de la claridad relativa de una superficie cuando es iluminada y observada verticalmente. Así, el albedo normal de una superficie blanca es aproximadamente 1 mientras que el de una superficie negra es aproximadamente 0. Estos parámetros se seleccionaron debido a que sus escalas pueden equipolarse con las del albedo. Las escalas de ambos índices consideran como valor 0 el del negro “puro” y como valor 100 el del blanco “puro”. También se midió el brillo de las superficies (Minolta Multi-Gloss 268 con un ángulo de medida de 85°) como otro indicador de la reflectancia de cada una de las superficies.

La medida del color total se obtuvo a partir de una malla de 3 x 3 puntos en la superficie de la roca sin modificaciones en la ventana del aparato, mientras que a medida del color en cada uno de los minerales individuales se obtuvo a partir de 4 medidas con la anteriormente mencionada reducción de la ventana de medida.

Las muestras se situaron como en el caso de los perfiles de temperatura con una única cara (12 x 12 cm) expuesta verticalmente a la radiación. Los bloques se aislaron completamente a excepción de la cara expuesta con una cubierta de poliestireno expandido de 1,5 cm de espesor. Cada muestra se expuso a tres tipos de ciclo con diferentes temperaturas de fondo establecidas. Debido a que el prototipo diseñado en esta tesis no permitía descender la temperatura y sin embargo se querían ensayar ciclos cercanos al punto de congelación, se realizó una “simulación” de la disposición de la cámara de radiación, como se muestra en la figura 7.2. Esto hizo que se perdiera calidad en cuanto al automatismo del experimento, debido a que no se podían programar ciclos de radiación y hubo que hacerlo de forma manual.

Para esta simulación se utilizó una cámara climática convencional con calentamiento por convección (WTB Binder KBF240) con un volumen interno de 50 x 60 x 80 cm. En su interior se replicó la posición y distancias del sistema de calentamiento por radiación establecido en el prototipo experimental propio (figura 7.2). Así, se situaron dos lámparas de infrarrojos de 275 W a 35 cm de la superficie de la roca como en el prototipo descrito en el capítulo 5.



**Figura 7.2:** Diseño experimental del ensayo, basado en la cámara experimental propia.

El funcionamiento del experimento modela la existencia de una temperatura de base (“nocturna”) generada por un régimen de calentamiento convectivo, sobre la que se impone un calentamiento por radiación (insolación). Específicamente en la forma de ciclos de corto rango, puesto que si la disgregación granular se debe a fenómenos de fatiga, es de esperar que

los ciclos de corto rango tengan mayor importancia que los diurnos.

Las muestras se situaron en el interior de la cámara un periodo de al menos 10 horas antes del comienzo de los ciclos hasta la total homogeneización de la temperatura del material con el ambiente. Sobre estas condiciones ambientales se superpuso un ciclo de corto rango que consistía en 20 minutos de radiación seguido de 25 minutos sin radiación. Las temperaturas de convección fueron 20, 10 y 0° C (de aquí en adelante condiciones “cálidas”, “frescas” y “frías”, respectivamente).

Las condiciones en la cámara se midieron con un termistor con escudo para la radiación y una sonda de humedad (Grant instruments). Aprovechando las perforaciones que se realizaron para los ensayos de perfiles, se controló la temperatura con un termistor de bola (con cabezal 2 mm de diámetro) en un punto arbitrario dentro del material durante todos los ciclos para controlar la correcta repetibilidad de los ciclos y eliminar la posibilidad de estar considerando como diferencias de temperatura reales lo que en realidad sería un artefacto del experimento.

Todas estas medidas se recogieron a intervalos de un minuto con un 8-bit Grant Instrument Squirrel. Las temperaturas de superficie se midieron con un termómetro de infrarrojos Minolta Land Cyclops 330S conectado a un procesador de datos DP-C2. el diámetro del objetivo era de 2 mm a la distancia focal de 17 cm empleada en el experimento. La termometría de infrarrojos aseguraba la adquisición de temperaturas de superficie sin usar sensores de contacto, que pueden influenciar la medida obtenida debido a un *efecto sensor*. Llamamos *efecto sensor* a la influencia que la materialidad de una sonda de temperatura o termistor puede tener en el valor de temperatura obtenido.

Un sensor, sea del material que sea, tendrá unas propiedades térmicas determinadas frente a la radiación que van a influir en las medidas con él obtenidas. La repetibilidad del termómetro es de  $\pm 0.5$  °C dentro del rango de temperaturas de los experimentos.

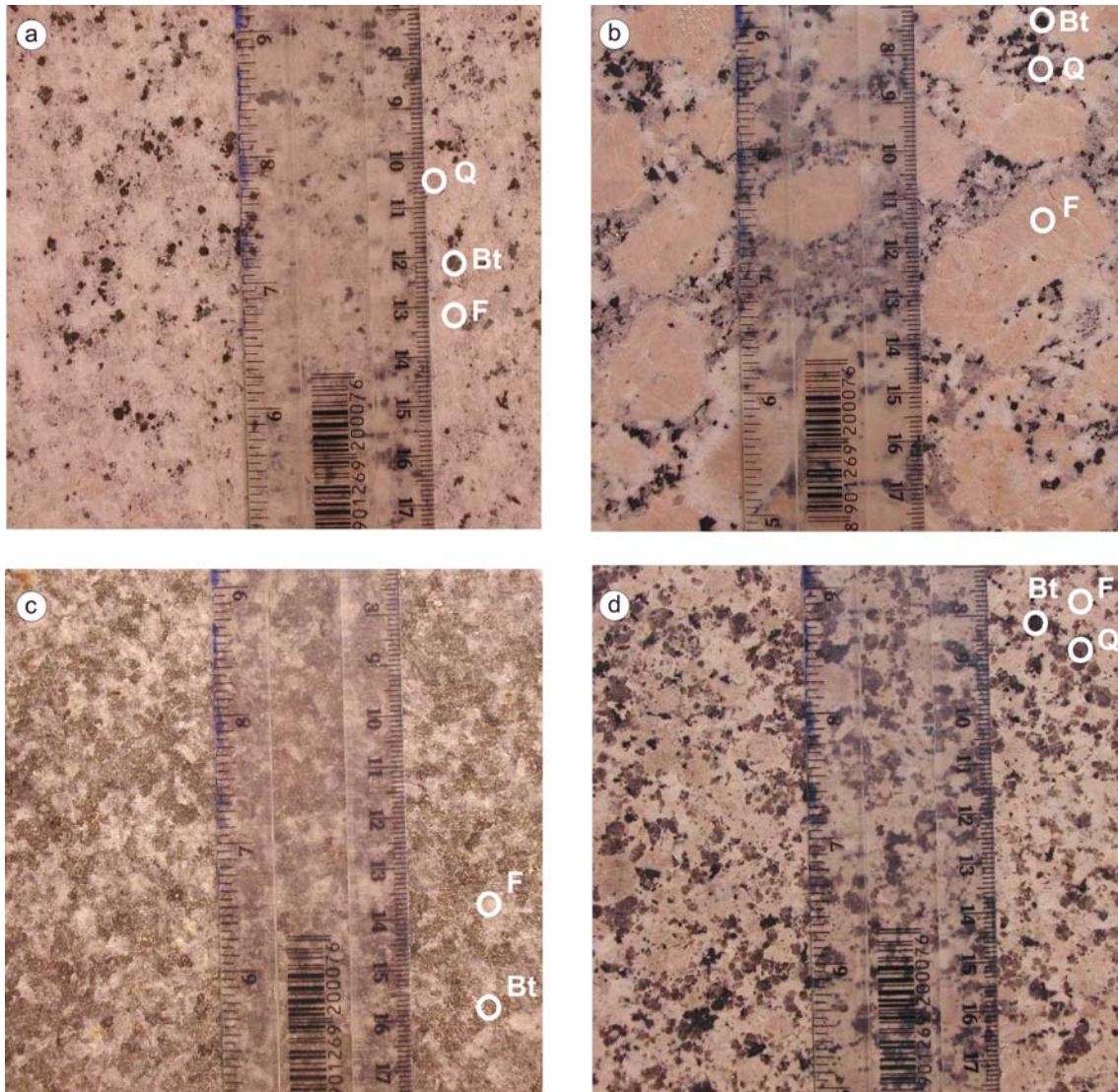
Las series de datos para cada mineral en concreto fueron, de necesidad, resultado de un experimento diferente, así se examinaron estadísticamente las condiciones medidas de temperatura y humedad ambiental, así como del punto de control en el interior de la muestra para comprobar la homogeneidad de los ciclos y asegurar que las diferencias de temperatura recogidos entre los granos minerales no fuesen producto de posibles diferencias en las condiciones ambientales de la cámara de un ciclo a otro. El valor estadístico utilizado para esta valoración fue la media de la desviación estándar de las condiciones (esto es, humedad, temperatura ambiental y temperatura en el punto del interior de las muestras) para cada punto temporal de medida en cada tipo de ciclo.

## 7.2. Caracterización de los materiales.

Las muestras seleccionadas, que se conocen con los nombres comerciales de granito *Rosavel*, granito *Blanco Castilla*, granito *Mourne* y granito *Negro Ocho*, ya han sido descritas en el capítulo 6, pero a modo de recuerdo diremos que *Rosavel* es un granito porfirítico de grano medio con fenocristales de feldespato potásico peritítico mostrando maclas de Karlsbader. *Blanco Castilla* es un monzogranito panalotriomorfo de grano medio con tendencia inequigranular. *Mourne* es un leucogranito de grano grueso, también con tendencia inequigranular, y *Negro Ocho* es una diorita de grano fino con hornblenda, biotita, ortopiroxeno y plagioclasa como principales constituyentes. La figura 7.3 refleja el aspecto superficial de las muestras donde aparecen resaltados los granos minerales seleccionados para la medida de las temperaturas.

La tabla 7.1 muestra los parámetros de color seleccionados para cada una de las muestras en conjunto como expresión del albedo, ya que hasta la fecha ha sido el principal factor que se ha tenido en cuenta para explicar las diferencias en las temperaturas de superficie entre las distintas rocas como consecuencia de regímenes de calentamiento por radiación. Se muestran también las propiedades térmicas

individualizadas para cada mineral, donde destaca que la diferencia entre los albedos de los diferentes minerales alcanza valores comparables a los encontrados entre rocas de alto y bajo albedo de conjunto.



**Figura 7.3:** Aspecto superficial de los materiales ensayados: Granito Blanco Castilla (a), Rosavel (b), Negro Ocho (c) y Mourne (d) donde se indica los granos minerales muestreados en cada caso.

	L*	Color total WI	Brillo	Mineral	Area (mm <sup>2</sup> )	Color del mineral L*	WI	Conductividad <sup>a</sup> (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Cap. calorífica <sup>a</sup> (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Castilla	77 ± 2	44 ± 3	0.7 ± 0.1	Feldespato K	148	84 ± 2.0	47 ± 7	2.31	0.61
				Cuarzo	42	74 ± 2.0	43 ± 1	7.69	0.70
				Biotita	9	55 ± 9.0	19 ± 2	1.17	0.21
Rosavel	73 ± 3	25 ± 7	4.0 ± 2.0	Feldespato K	816	73 ± 1.0	12 ± 1	2.31	0.61
				Cuarzo	30	50 ± 1.0	13 ± 1	7.69	0.70
				Biotita	6	38 ± 3.0	6.9 ± 0.5	1.17	0.21
Mourne	66 ± 4	14 ± 1	10.0 ± 2.0	Feldespato K	60	73 ± 1.0	19 ± 4	2.31	0.61
				Cuarzo	12	45 ± 1.0	12 ± 2	7.69	0.70
				Biotita	15	37 ± 6.0	7 ± 3	1.17	0.21
Ochavo	44 ± 1	13 ± 1	1.3 ± 0.6	Plagioclasa	84	52 ± 2.0	18.2 ± 0.3	1.68-2.31	0.70-0.71
				Biotita	52	36 ± 1.0	7.7 ± 0.9	1.17	0.21

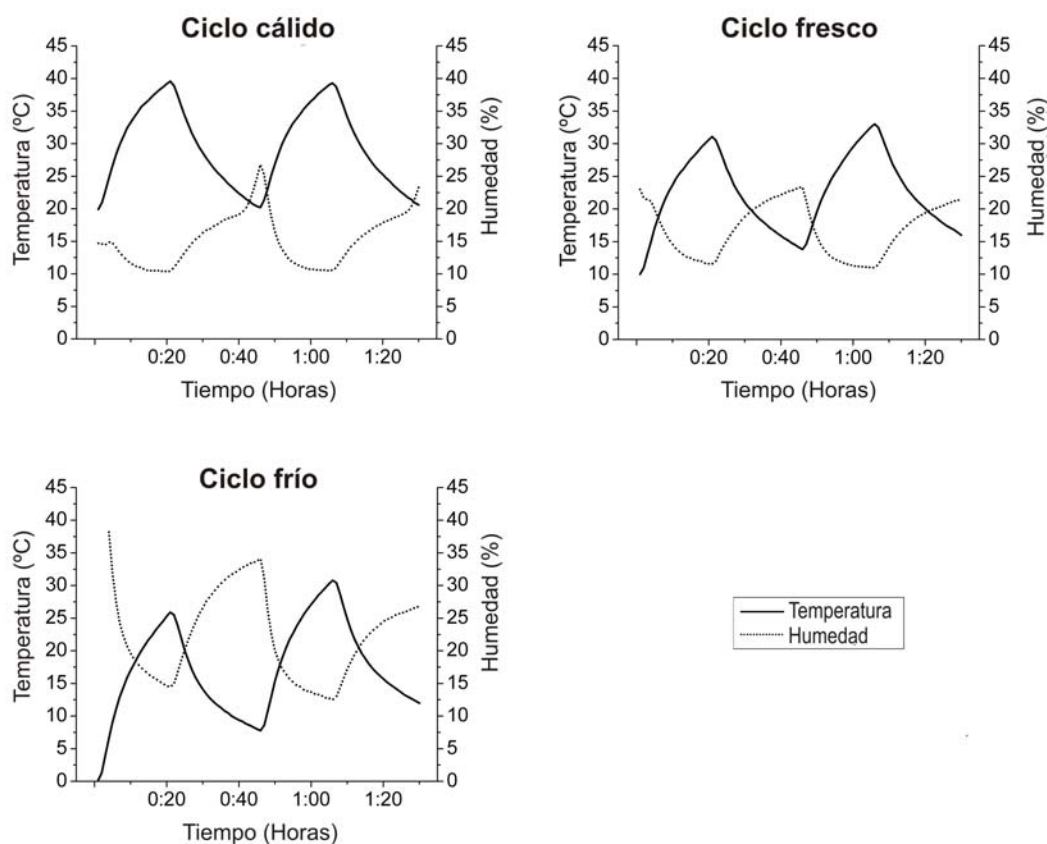
**Tabla 7.1:** Color y tamaño medido en las muestras del estudio. Se incluyen los valores teóricos de conductividad térmica y capacidad calorífica. <sup>a</sup> (Čermák y Rybach, 1982).

### 7.3. Evolución de la temperatura superficial de los materiales.

Las representaciones gráficas de las diferentes condiciones de temperatura y humedad para cada uno de los ciclos están representadas en la figura 7.4. La repetibilidad media, considerando todos los ciclos, de la temperatura ambiente es de  $0,7 \pm 0,4$  °C. El valor para la humedad relativa es de  $1,5 \pm 1,3$  % y el de los puntos de control en el interior del material es de  $0,4 \pm 0,2$  °C. Estos valores, así como los márgenes de error del termómetro, son inferiores a las diferencias recogidas en la medida de temperaturas de los diferentes cristales por lo que se puede considerar de manera fiable que estas diferencias son reales y no una consecuencia de la deriva de condiciones ambientales de un experimento a otro.

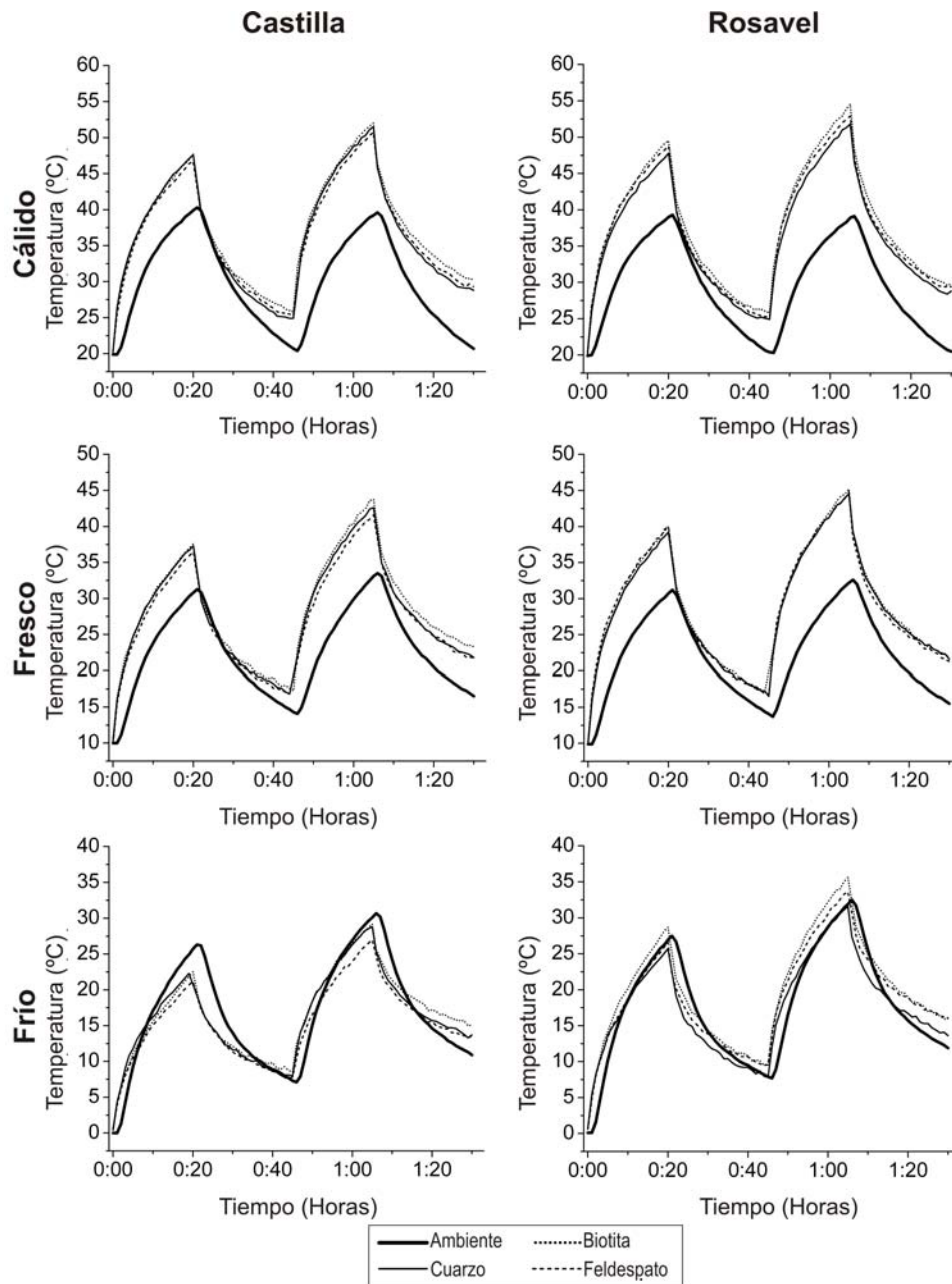
Las temperaturas superficiales recogidas se muestran en la figura 7.5. La temperatura media superficial excede ampliamente la temperatura en un valor que, como se ha visto en los experimentos del capítulo anterior, está relacionado con el albedo total de las superficies. Los ciclos experimentales con regímenes de temperatura fríos son la excepción a este comportamiento. Las superficies con alto albedo (como es el caso del granito *Blanco Castilla*) alcanzan una temperatura superficial menor a la ambiental. Mientras, la temperatura superficial de las muestras con albedos intermedios, como los granitos *Rosavel* y *Mourne*, apenas excede la temperatura ambiente en las rampas ascendentes para enfriarse por debajo de la misma en las rampas descendentes.

Las muestras con albedo bajo como el *Negro Ochavo* muestran una temperatura superficial más alta que la temperatura ambiente para todo el ciclo. Esto confirma el rol asumido que el albedo tiene en las temperaturas superficiales medias alcanzadas. Para cada tipo de muestra los ciclos ambientales cálidos muestran las mayores diferencias entre las temperaturas superficiales y las ambientales. En este sentido las diferencias entre la temperatura ambiente y la temperatura media de la superficie oscila entre  $-8.5$  y  $13$  °C en el granito *Blanco Castilla*, entre  $-6.5$  y  $14,5$  °C en *Rosavel*, entre  $-4$  y  $13.5$  °C en el granito *Mourne*, y entre  $0$  y  $20$  °C en el *Negro Ochavo*. Sin embargo, las muestras con albedos intermedios muestran relaciones incongruentes entre albedo y temperatura, lo que se puede deber, como se discutirá después, a las diferencias de tamaño de grano. Aunque las diferencias de temperatura entre los granos minerales son menores que las diferencias de temperaturas entre la superficie y el interior, se recogen diferencias de temperatura notables entre los minerales que alcanzan hasta  $4$  °C.



**Figura 7.4:** Condiciones ambientales de temperatura y humedad en los ciclos diseñados para este experimento..



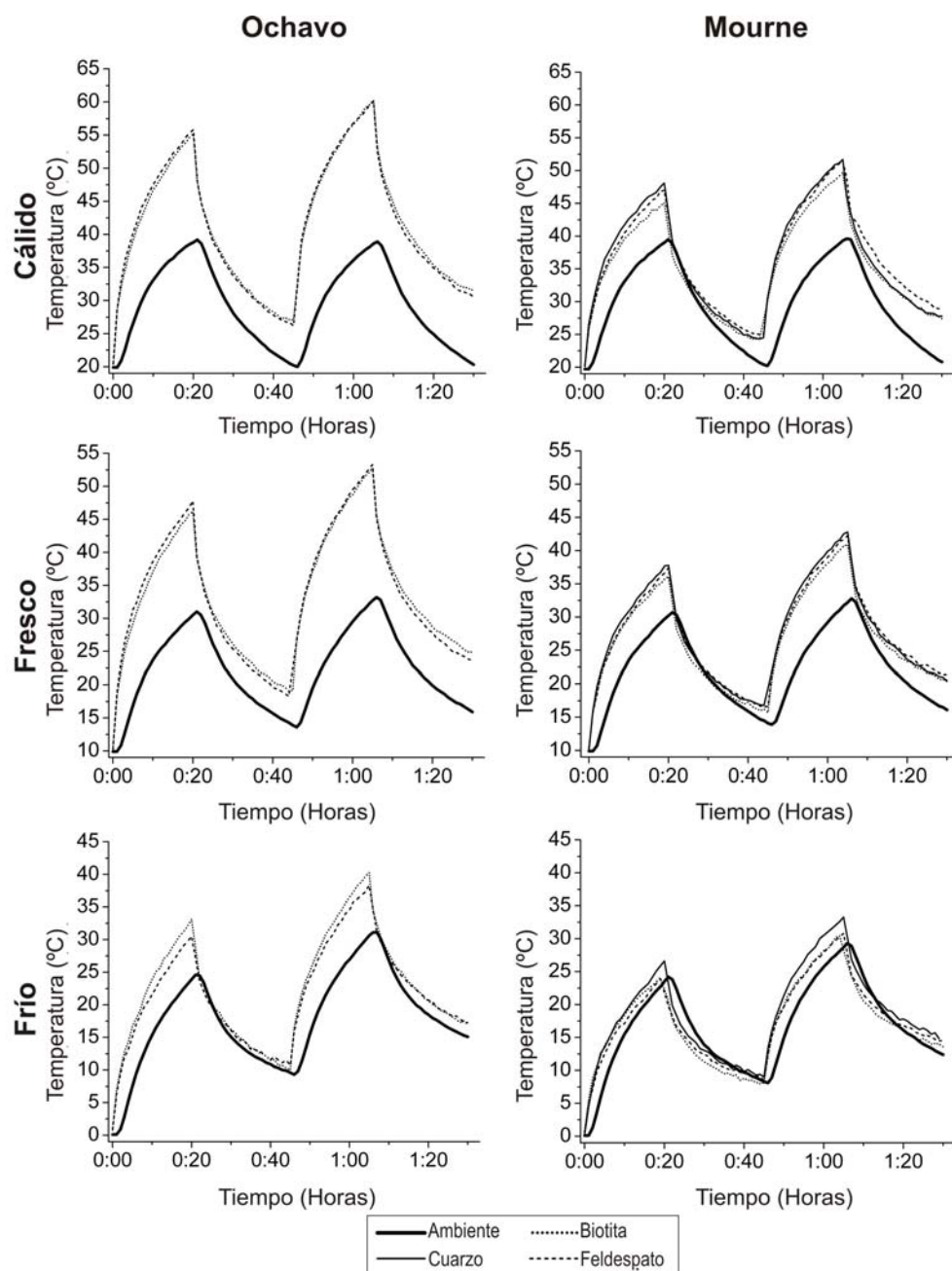


**Figura 7.5a:** resultados de temperaturas obtenidas en los ciclos experimentales.

La tabla 7.2 recoge las diferencias máximas de temperatura alcanzadas para cada ciclo en cada experimento. La figura 7.6 representa las diferencias entre los diferentes minerales a lo largo de los ciclos experimentales. El signo y distribución de las diferencias varía entre las diferentes muestras y condiciones ambientales, lo que sugiere un control complejo de estas diferencias, por lo que no se deberá tener en cuenta una única propiedad de los minerales para la discusión de estas diferencias. Más aún, las gráficas de la figura 7.6 muestran como los regímenes de temperatura sobre los que se



sobrepone el calentamiento con las lámparas, que expresarían las condiciones ambientales “estáticas” en ausencia de radiación, ejercen un control importante en las diferencias de temperatura superficiales alcanzadas por los minerales. En este sentido, comparando los valores para cada muestra, los ciclos fríos realzan las diferencias entre los diferentes minerales.

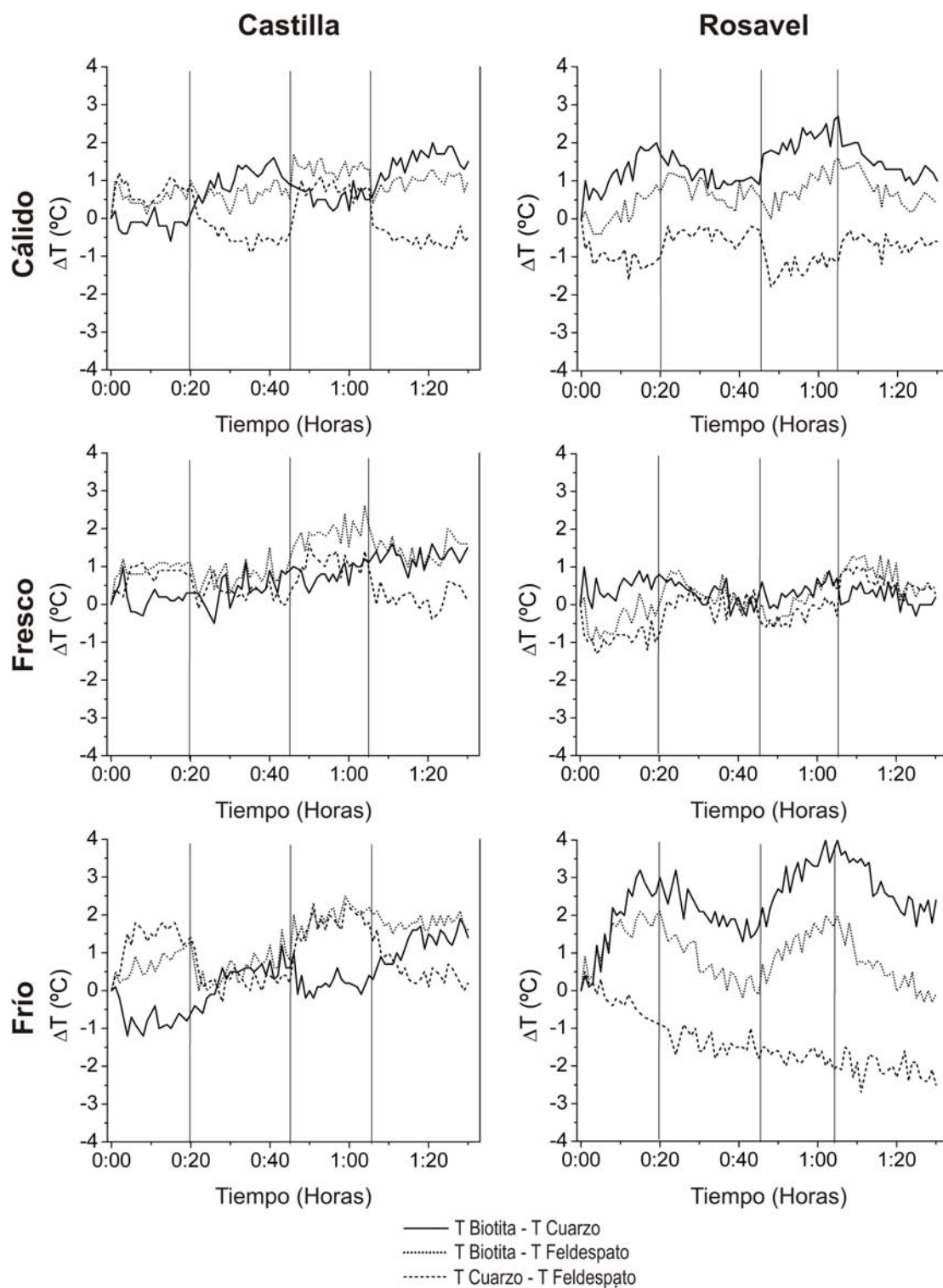


**Figura 7.5b:** resultados de temperaturas obtenidas en los ciclos experimentales.

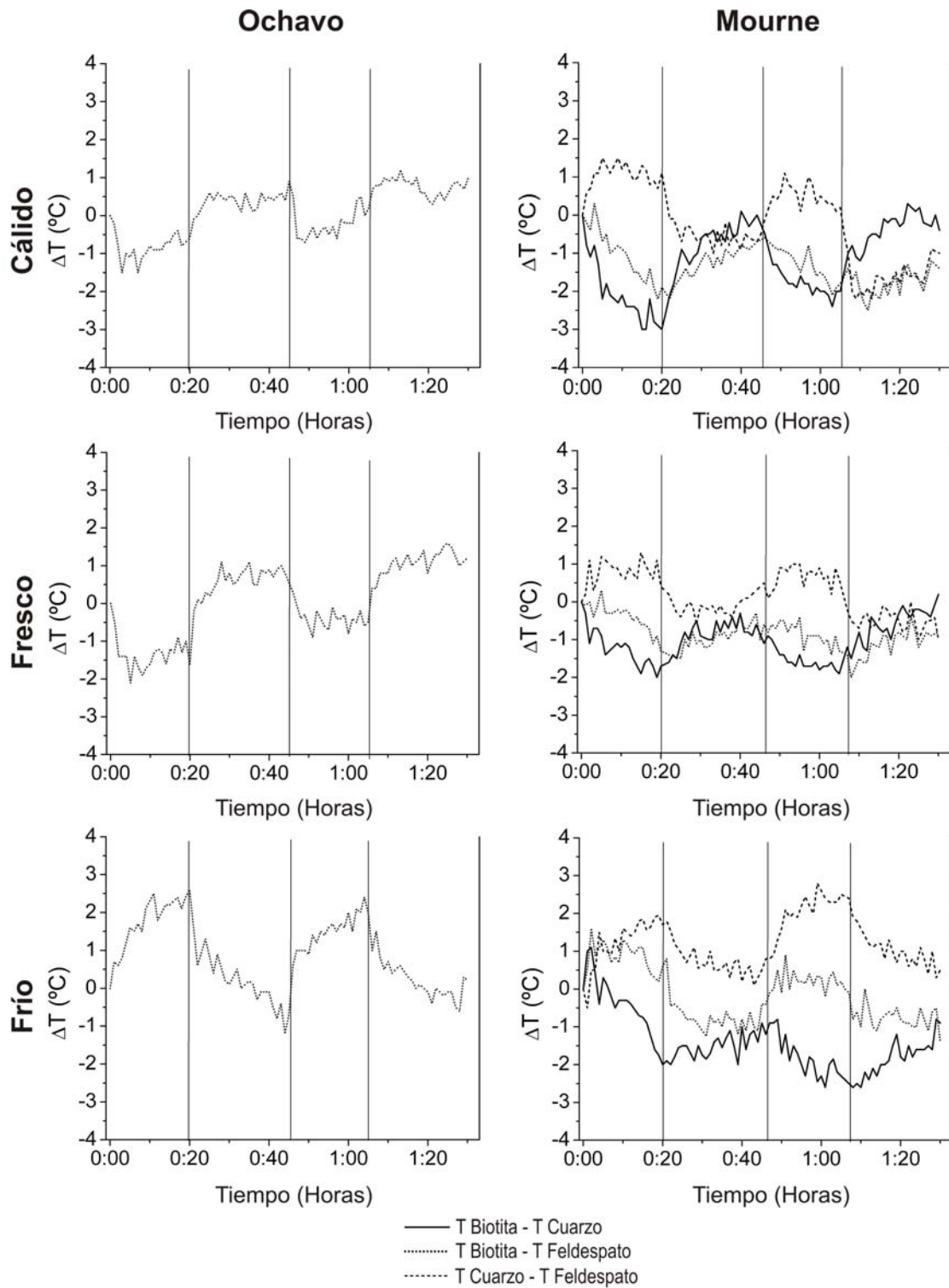
**Tabla 7.2:** Diferencias máximas de temperatura (°C) de superficie entre los diferentes minerales de las muestras estudiadas.

		Ciclos cálidos		Ciclos frescos		Ciclos fríos	
		Pico 1	Pico 2	Pico 1	Pico 2	Pico 1	Pico 2
Castilla	Biotita – Cuarzo	1.4	2	1.0	1.6	-1.2	1.9
	Biotita – Feldesp.	1.0	1.6	1.2	2.6	1.3	2.5
	Cuarzo – Feldesp.	1.2	-0.8	1.1	1.6	1.8	2.3
Rosavel	Biotita – Cuarzo	2.0	2.7	0.9	0.9	3.2	4.0
	Biotita – Feldesp.	1.2	1.6	-1.0	1.3	2.1	2.0
	Cuarzo – Feldesp.	-1.3	-1.8	-1.3	1.0	-1.8	-2.7
Mourne	Biotita – Cuarzo	-3.0	-2.4	-2.0	-1.9	-2.0	-2.6
	Biotita – Feldesp.	-2.2	-2.5	-1.5	-1.5	1.6	0.9
	Cuarzo – Feldesp.	1.5	-2.2	1.3	1.3	1.9	2.8
Ochavo	Biotita – Feldesp.	-1.5	1.2	-2.1	1.6	2.6	2.4

Los resultados demuestran que existen diferencias notables entre las temperaturas superficiales de los distintos granos minerales bajo un amplio rango de regímenes cíclicos simulados de temperatura. Estas diferencias sugieren claramente que considerar la superficie de la roca como un material homogéneo en términos de su comportamiento térmico nos lleva a una simplificación del comportamiento real de las superficies. Es, por tanto, importante tener en cuenta las propiedades térmicas de cada uno de los granos minerales en vez de considerar solo los aspectos generales de la roca. El origen de las diferencias de temperatura yace en el balance de energía en la superficie de cada mineral. Por un lado la entrada de energía debida al albedo y la capacidad calorífica de cada uno de los diferentes minerales: cuanto menor es el albedo, mayor es el calor captado por el mineral y cuanto más baja la capacidad calorífica, la temperatura aumenta más rápidamente. Por otro lado el grado de “disipación”, esto es la fuga de calor debido al flujo térmico a través de cada mineral por conducción hacia zonas más profundas del cristal o a minerales adyacentes. En general, cuanto mayor es la conductividad térmica, el flujo de calor es más rápido y antes se alcanza el equilibrio entre las diferentes zonas del cristal o de la roca, y en cuanto a la masa térmica, cuanto mayores son los cristales, más despacio se alcanzan unas condiciones de equilibrio. El balance de estos flujos de entrada y salida determinan la temperatura en un mineral y las diferencias con sus adyacentes.



**Figura 7.6 a:** Diferencias de temperaturas entre los minerales.



**Figura 7.6 b:** Diferencias de temperaturas entre los minerales.

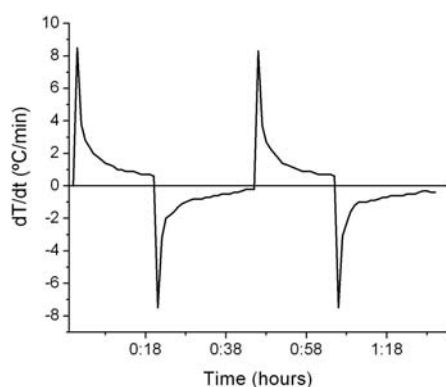
Las temperaturas ambientales tienen también una influencia importante en este balance de energía, como afirma la ley de enfriamiento de Newton, la velocidad de enfriamiento depende directamente de las diferencias de temperatura entre los cuerpos y las condiciones ambientales. Sin embargo, dado que la tasa de enfriamiento decrece exponencialmente con el tiempo, los minerales con diferencias de temperatura menores alcanzan invariablemente una temperatura de equilibrio más rápidamente. Como se ha dicho antes, las condiciones experimentales frías favorecen la existencia de mayores diferencias de temperatura entre los granos dado que introducen un mayor control sobre la velocidad de enfriamiento que los otros casos por la mayor diferencia entre las temperaturas de la roca y del ambiente que los minerales tienen que superar. Debido a esto, es un error pensar en el deterioro térmico como algo restringido a condiciones ambientales cálidas.

El albedo total se ha considerado como el principal control en las temperaturas de superficie de las rocas. Los resultados muestran la importancia de considerar las diferencias en el albedo de los granos minerales individuales puesto que estas diferencias son de una magnitud comparable a la que presentan rocas de alto y bajo albedo cuando se consideran sus valores totales. Esto subraya que las consideraciones de diferencias de temperaturas entre rocas basadas solo en valores generales de color o albedo tiende a simplificar los procesos que realmente tienen lugar en la evolución de las temperaturas de superficie. Las distribuciones de temperatura mostradas en la figura 7.5 y las diferencias expuestas en la figura 7.6 sostienen claramente este argumento. De los datos de la tabla 7.1, parecería que hubiera una secuencia “normal” en el orden de los minerales si los clasificamos por sus valores de temperatura máxima. El mineral que alcanzaría las mayores temperaturas es la biotita, donde concurren los menores valores de albedo, conductividad térmica y capacidad calorífica. Todas estas características favorecen el aumento rápido de temperatura. Después de la biotita, es de esperar que el cuarzo fuese el siguiente en la clasificación si el albedo fuera el único control sobre la temperatura máxima alcanzada. Sin embargo, esto no se ve reflejado claramente en los resultados experimentales. Esto no sorprende dado que el cuarzo tiene una conductividad térmica y capacidad calorífica mayor que los feldespatos (tanto potásicos como plagioclasas). Más aún, de las distribuciones de temperatura observadas en los experimentos solo las muestras de *Rosavel* muestran la secuencia  $T_{\text{biotita}} > T_{\text{feldespato}} > T_{\text{cuarzo}}$  que podría considerarse “normal” si no se tuviese en cuenta propiedades como el

tamaño de los cristales. Esto introduce el concepto de tamaño de grano como un factor importante a ser tomado en consideración cuando se analiza la significación de las diferencias térmicas.

Las diferencias térmicas entre granos minerales son importantes puesto que magnifican los efectos que los gradientes de temperatura pueden tener en el deterioro mecánico de las rocas. Esto se debe principalmente al hecho de que estas diferencias contribuyen con campos de esfuerzo más complejos que los que podríamos esperar cuando consideramos un único grano mineral o un cuerpo homogéneo. Todos los minerales tenderían a un equilibrio en un ambiente con condiciones de calentamiento constantes. Las gráficas expuestas en la figura 7.6 muestran la secuencia de los estados desde el estado inicial de equilibrio, pasando por el desequilibrio producido por el calentamiento, que se traduce en la aparición de diferencias de temperatura entre los diferentes minerales, hasta la tendencia a alcanzar un nuevo estado de equilibrio, que se refleja en la estabilización o disminución de estas diferencias de temperatura. Esto es especialmente claro en la primera rampa de calentamiento de los experimentos. Durante la primera parte de la rampa de calentamiento las diferencias de temperatura aumentan y se estabilizan tras un periodo de tiempo que depende de la muestra estudiada, es decir, del “paisaje mineral” circundante en cada una de las muestras. Dependiendo de estos diferentes ambientes minerales de las muestras se puede observar un descenso de las diferencias de temperatura en la última parte de la rampa de calentamiento, como consecuencia de la deriva hacia el nuevo estado de equilibrio impuesto por el calentamiento radiante. Cuando la radiación cesa, se genera un nuevo desequilibrio durante el enfriamiento. La rampa de enfriamiento muestra un proceso similar pero de signo contrario, que se manifiesta especialmente en los materiales de grano fino, conduciendo a una inversión de las relaciones de temperatura entre los diferentes granos minerales.

Además de las posibles deformaciones generadas por las diferencias de temperatura entre los granos minerales, cada uno de los minerales va a experimentar también una serie de deformaciones de manera individual. Ambos procesos no deben considerarse como alternativas, sino como factores individuales que se combinan para producir un campo de esfuerzos complejo que puede conducir al fallo mecánico irreversible del material a través de la disgregación granular.



**Figura 7.7:** Función derivada de la evolución de temperaturas de superficie bajo ciclos de corto rango simulados de insolación. Datos obtenidos de *Ochavo* en ciclo cálido.

La figura 7.7 representa un modelo de la función derivada de la distribución de temperaturas de un mineral durante el calentamiento obtenido a partir de los datos de la diorita *Negro ochavo* en ambiente cálido. Los mayores gradientes de temperatura para cada grano individual se limitan a los primeros minutos tras el encendido o apagado de las lámparas. Más aún, los gradientes mayores de 2°C/min, que como sugirió Yatsu (1988) promoverían deformaciones irreversibles,

se encuentran confinados a los primeros cinco minutos tras cada encendido o apagado de las lámparas. Posteriormente, la tasa de cambio decrece según una forma  $1/x$  (que corresponde a la derivada de un logaritmo natural) como resultado de la tendencia al equilibrio del mineral con su ambiente tanto en el calentamiento como en el enfriamiento. Esto significa que las variaciones de temperatura de corto rango podrían tener un efecto importante puesto que los gradientes de temperatura más altos a través de los que el deterioro mecánico puede venir con mayor probabilidad están confinados en un intervalo muy corto. De tal manera, el calentamiento prolongado no tendría tanta importancia para la deformación irreversible experimentada por cada grano mineral. Esto se refleja en las diferencias de temperatura entre los minerales (figura 7.6) en las cuales los máximos se sitúan en las rampas de ascenso y descenso de temperatura durante el calentamiento y el enfriamiento y no en los picos de temperatura del ambiente o los minerales.

Estas observaciones señalan la importancia que las variaciones de corto rango debidas al viento, nubosidad u otros agentes que produzcan sombras (aunque generen variaciones pequeñas) pueden llegar a tener para determinar hasta que grado puede ser efectiva la acción del calentamiento y enfriamiento como agente de deterioro en los edificios. Esta importancia se discutirá más detenidamente sobre un caso real en el capítulo 9 de esta tesis.

Como se observará en el capítulo mencionado, cada episodio de viento, o sombra genera dos rampas de rápido descenso y posterior ascenso de la temperatura y acentúa la

diferencia de temperaturas entre las zonas de alto albedo y bajo albedo dentro de una roca. Todos estos efectos tienen implicaciones mecánicas importantes y como se discutirá más adelante contribuyen al deterioro de la roca debido a fenómenos de fatiga térmica. En este caso, la fatiga se expresa a partir de la relación que existe entre el deterioro y modelos de fractura como los propuestos por Griffith (1921) en los cuales la coalescencia de pequeñas fracturas es el mecanismo más importante que resulta en la rotura definitiva del material.

Así es importante considerar la combinación de los dos tipos de deformación de superficie presentados: Por un lado la que presenta un mineral en si mismo, debido a los gradientes repetidos de corto rango y el factor amplificador que supone el comportamiento disimilar de granos minerales adyacentes con diferentes respuestas al calor radiante.

Como conclusión se puede asegurar que existen diferencias entre las temperaturas de superficie de los distintos minerales de las rocas. Aunque estas diferencias son pequeñas comparadas con las obtenidas cuando se compara la temperatura de superficie con cualquier punto arbitrario en el interior del material, pueden ser suficientes para favorecer la disgregación granular a través de fenómenos de fatiga en la zona más sensible de los materiales: la superficie. Estas diferencias introducen campos de esfuerzos que se suman a los esfuerzos que sufre cada grano mineral individual a causa del calentamiento y enfriamiento sucesivo, creando una situación de esfuerzos en la superficie mucho más compleja que si consideramos la superficie como un ente homogéneo.

La existencia de estas diferencias resalta algunos de los puntos importantes con respecto al estudio de los procesos de termoclastia. Primero la importancia de realizar un muestreo fino en la recogida de temperaturas de las rocas, tanto en la medida de los perfiles como en la superficie. Debido a que la superficie del material presenta menor carga confinante, los procesos de disgregación en superficie son mucho más probables. Así, la disgregación granular o los microdesplacados de escala granular debido a diferencias de temperatura a escala granular se podría considerar el mecanismo principal por el cual la llamada *meteorización por insolación* pudiera tener un control directo en el proceso de deterioro de los materiales pétreos de construcción. De tal manera el estudio detallado de los esfuerzos de cizalla entre los diferentes minerales



sería más importantes que los efectos de tensión de la dilatación de rodajas de roca. El uso de temperaturas de superficie medias es una simplificación que enmascara los efectos en superficie que son más frecuentes y probables que los efectos “profundos” sugeridos por las teorías de fractura térmica del material a través de efectos tales como el desplacado de espesores considerables de roca.

El hecho de que aparentemente las diferencias de temperatura más importantes y los gradientes más intensos se encuentran durante el inicio de las rampas de calentamiento y enfriamiento de los ciclos sugiere que los climas donde susceptiblemente se producirían procesos de termoclastia no tienen que ser necesariamente extremadamente cálidos o fríos como hasta ahora se ha propuesto. De hecho el clima de las latitudes medias puede proveer con numerosos periodos de rápido aumento y/o descenso de la temperatura, como se estudiará en el capítulo 9. De este modo, la termoclastia no debe considerarse solo desde el punto de vista de las temperaturas alcanzadas, sino también del número de variaciones de corto rango causadas por viento o nubes: El muestreo fino es importante tanto en espacio como en el tiempo.

## **8. Implicaciones del régimen de calentamiento en el ensayo de deterioro por sales.**

En los capítulos anteriores se han estudiado las diferencias de temperatura que se pueden alcanzar en un material pétreo como consecuencia de los distintos regímenes de calentamiento utilizados en su ensayo. Además de las consecuencias que los incrementos de temperatura obtenidos bajo regímenes de radiación puedan tener como magnificadoras de las diferencias de dilatación térmica y, por tanto, posible causa de deterioro en los materiales pétreo, la distinta respuesta térmica de los materiales dependiendo del modo de calentamiento tiene consecuencias claras en lo que se refiere a la validez de los ensayos realizados en laboratorio sobre los materiales.

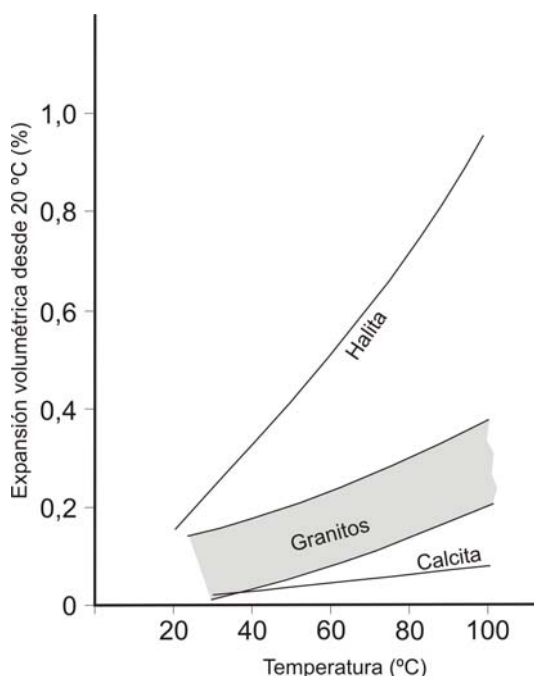
Aunque los resultados de los ensayos de envejecimiento en laboratorio basados sólo en la oscilación térmica en regímenes de radiación no ofrecen tasas de deterioro apreciablemente mayores que en regímenes de convección para los ciclos estudiados, las diferencias de temperaturas tanto en perfil como en superficie obtenidas bajo regímenes de radiación pueden influir también en otros agentes de deterioro controlándolos en gran medida. Uno de estos agentes es la cristalización de sales. Está ampliamente demostrado que la cristalización de sales solubles en los poros de la piedra es uno de los mecanismos de deterioro más importantes del patrimonio arquitectónico (Schaffer, 1932; Correns, 1949, Winkler, 1973; Goudie y Viles, 1997; Rodríguez-Navarro y Doehne, 1999; Benavente et al., 1999; Flatt, 2002) y la temperatura ejerce una influencia muy importante en su dinámica de cristalización y puede tener influencia en posteriores procesos de dilatación diferencial.

La cristalización de sales en los poros de una roca se rige por mecanismos muy complejos en los que influyen muchas características tanto del sistema poroso como de la solución incluida y se produce cuando una fase en solución alcanza la sobresaturación y se dan las condiciones para que se formen núcleos a partir de los cuales crezcan los cristales. La temperatura es una de las variables más importantes para que una solución alcance la sobresaturación. Por ejemplo, el incremento de energía libre ( $\Delta G$ ), que condiciona que se pueda producir la precipitación, es directamente proporcional a la temperatura:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \cdot \ln PAI$$

(Donde  $\Delta G^\circ$  es el incremento de energía libre estándar, R es la constante de los gases y PAI es el producto de actividad iónica o producto de las actividades de los iones que participan en la formación de una determinada sal)

De tal manera la consideración de la temperatura que existe en cada punto de la roca es fundamental para determinar que procesos de cristalización de sales se pueden producir en el seno del material y en que posición. Como se ha mostrado en los anteriores capítulos, la distribución de temperaturas en un material varía con respecto al régimen de calentamiento, y por tanto es esperable que los procesos de cristalización varíen dependiendo del régimen de ensayo.



**Figura 8.1:** Expansión térmica de la halita comparada con calcita y rocas graníticas.

La expansión térmica de las sales puede llegar a ser mucho mayor que la de las rocas que las contienen a temperaturas relativamente bajas y los esfuerzos generados por estas diferencias es uno de los factores que favorece el deterioro producido por las sales (Cooke y Smalley, 1968; Winkler, 1973). Este factor se ha tenido siempre en cuenta a temperaturas menores que las que se pueden llegar a alcanzar en el seno de rocas bajo un régimen de insolación (Halsey et al, 1998; Warke et al, 1998).

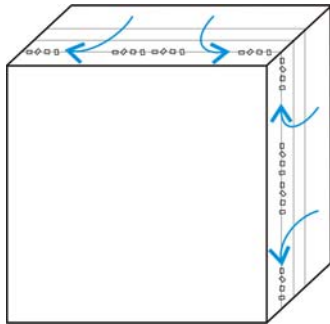
Según lo anterior, las propiedades térmicas tienen una influencia que usualmente no se

ha tenido en cuenta, ya que los ensayos convencionales de durabilidad con respecto a la degradación por cristalización de sales se realizan todos en estufas con regímenes de calentamiento por convección. Esta influencia, especialmente en las rocas de menor albedo puede infravalorar el fenómeno causado por las sales.

En este capítulo se mostrarán las diferencias en morfología y distribución de las sales cristalizadas en el sistema poroso de un material pétreo bajo los dos diferentes regímenes de calentamiento y las distintas implicaciones que para el deterioro de los materiales pueden tener.

## 8.1. Materiales y Métodos.

Se seleccionó un material pétreo en función de su alta porosidad y distribución de tamaño de poros, y por su frecuencia en la arquitectura de diferentes regiones españolas, tanto costeras como interiores. Entre los materiales porosos disponibles se seleccionó el de menor albedo posible para resaltar la anisotropía térmica que se produjese en el material. Así, se seleccionó la variedad de piedra denominada *Bateig azul*, que es una biomicrita extraída en la provincia de Alicante y comúnmente usada como material de construcción. Este material se comenzó a usar también en otros puntos de España, principalmente Madrid, a partir del establecimiento de las líneas de ferrocarril a mediados del siglo XIX (Fort et al., 2002).



**Figura 8.2:** Bloque diagrama del efecto que la laminación de una roca puede tener en la cristalización de sales. La solución puede concentrarse en los planos de las estructuras y producirse en ellos la cristalización de sales.

Para los ensayos se seleccionaron bloques de 10 x 10 x 10 cm. Los bloques se aislaron completamente a excepción de una cara con una cubierta de poliestireno expandido de 0,5 cm de espesor. Para seleccionar la cara que se expondría al calentamiento directo se midieron las velocidades  $V_p$  de ultrasonidos de estos bloques en las tres direcciones del espacio. Se seleccionó como cara expuesta la perpendicular a la dirección de menor

velocidad de ultrasonidos. Esto garantizaba que si existía algún tipo de laminación en el material, esta se situase perpendicular a la cara de calentamiento. Si una textura planar como la laminación se sitúa paralela a la cara expuesta, puede favorecer la precipitación de las sales a favor de esta (figura 8.2). Se eligió esta disposición para eliminar esta posibilidad y el riesgo de una disposición distinta entre la muestra sometida a radiación y la sometida a convección que pudiera haber falseado la comparación entre ambas.

Los bloques se secaron en estufa hasta pesada constante y se sumergieron, sin la cubierta de poliestireno, en una solución saturada de NaCl durante 48 horas. Aunque la inmersión total de las muestras en la salmuera no contempla mecanismos como la ascensión capilar, cuya importancia en un material poroso situado en un edificio es mucho mayor (Benavente et al., 2001), se ha seleccionado este método por ser el

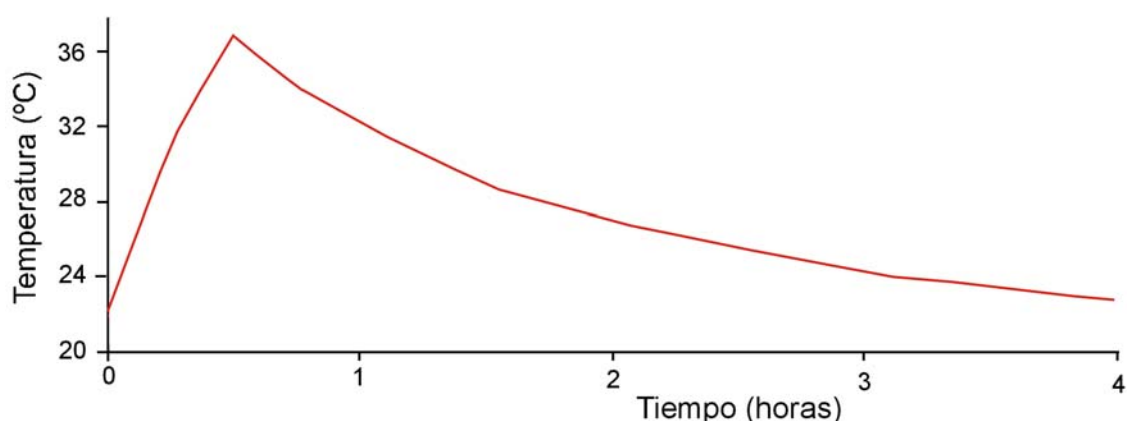
habitual en los ensayos de degradación por sales en laboratorio. El cloruro sódico se seleccionó por ser una sal que se usa normalmente en ensayos de deterioro acelerado (Goudie, 1974; Sperling y Cooke, 1985; Grossi y Esbert, 1994; Goudie y Viles, 1997; Benavente, 2002) y que presenta un alto coeficiente de dilatación térmica (ver figura 8.1). Además, esta sal no presenta cambios de fase que pudieran dificultar la interpretación de los resultados (como pudiera ser el caso del sulfato sódico, que se usa también con frecuencia en los ensayos de deterioro acelerado y que supone un sistema más complejo que da lugar a varias sales como la mirabilita y la thenardita). El cloruro sódico se encuentra frecuentemente en los edificios debido principalmente a la niebla salina en zonas costeras o a la sal arrojada en invierno para deshelar en zonas interiores (Winkler, 1973; Cooke, 1994; Goudie y Viles, 1997). Otra fuente frecuente de esta sal que afecta de forma general a los edificios son los excrementos de paloma (Gómez-Heras et al., 2004a).

Para los experimentos se utilizaron dos tipos de cámaras con un volumen interior similar de aproximadamente  $60 \text{ dm}^3$  (Figura 8.3). La cámara con calentamiento por convección corresponde a una estufa de laboratorio *Memmert 400* con termostato fijo, a la que se asoció un programador para controlar los ciclos de calentamiento. Por otro lado se utilizó la cámara automática de radiación (Gómez-Heras y Fort, 2002) que se describió en el capítulo 5 de esta tesis.



**Figura 8.3:** Cámaras experimentales utilizadas en este ensayo. Cámara convencional con régimen de calentamiento por convección (a) y cámara con calentamiento por radiación (b) que corresponde al prototipo diseñado para esta tesis.

En ambos casos se programaron las cámaras con un ciclo de temperatura de 4 horas entre 23 y 37 °C (Figura 8.4) basado en el patrón de distribución de temperaturas diarias obtenido por tratamiento estadístico de una base de datos, correspondientes a los años de 1993 a 1996 (ambos incluidos), recogidos en una estación climática situada en el Palacio Real de Madrid como se refiere en el capítulo 6 de esta tesis.



**Figura 8.4:** Ciclo experimental de temperaturas usado tanto en los ensayos de radiación como en los de convección.

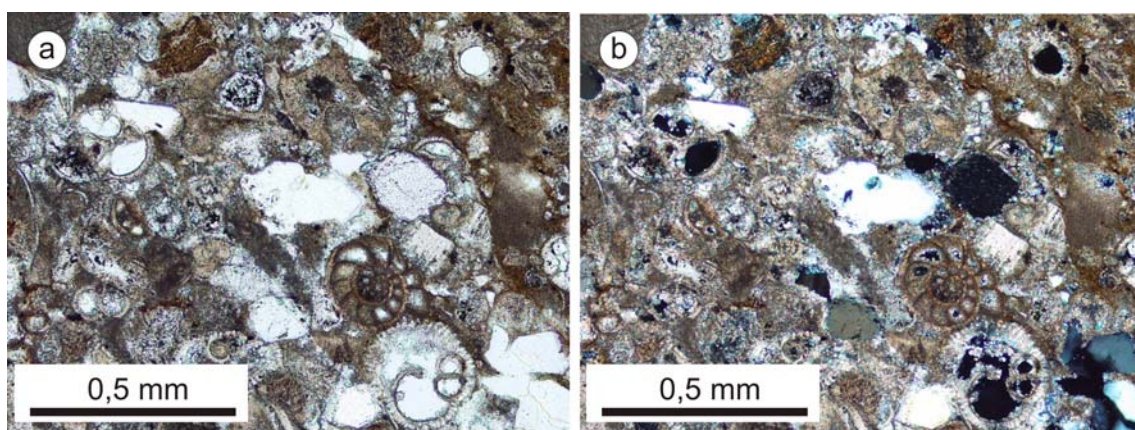
En ambos casos se dispuso en las cámaras 100 g de gel de sílice con indicador. La humedad de las cámaras es por tanto la definida por el gel de sílice (5%), que se ha mantenido constante dentro de los márgenes de cambio total de color del indicador que posee el gel de sílice. El gel se renovó durante los experimentos por otro regenerado, como máximo cada 20 ciclos.

El seguimiento del ensayo se realizó controlando la pérdida de peso, al principio del ensayo de manera diaria (cada 6 ciclos) y después de manera semanal (cada 42 ciclos). El ensayo se dio por finalizado cuando se detectó un descenso de peso en cada ciclo menor de 0,1 por mil (562 ciclos en convección y 570 ciclos en radiación). Durante el ensayo se tomaron fotografías de la superficie de cada una de las muestras ensayadas. Las pesadas se realizaron en la parte final de los ciclos para que la temperatura fuera lo más cercana posible a la temperatura ambiente. Para ello, la muestra se extraía de la cámara y se pesaba en una balanza externa para a continuación realizar la foto de superficie y retornar la muestra a la cámara.

Una vez finalizado el ensayo se retiró la cubierta de poliestireno expandido y a partir de la inspección visual del perfil de las muestras se tomaron varias muestras en la superficie y el interior del material para su observación por microscopía electrónica de barrido.

## 8.2. Caracterización del material.

Petrográficamente el material es una biomicrita (Figura 8.5) con foraminíferos, briozoos y bivalvos como bioclastos principales y cuarzo como terrígeno principal. También aparecen en menor proporción placas y espículas de equinodermos y algas rojas. El mineral detrítico principal es el cuarzo, aunque también aparecen en menor proporción feldespatos y fragmentos de rocas (dolomíticas y metamórficas, principalmente). Existe una matriz de calcita micrítica y se observan cementos de sílice y cementos calcíticos tipo *drusy*. La presencia de glauconita como mineral autigénico es notable, pudiendo ser una de las causas del color azulado de este material. Los parámetros petrofísicos y la distribución de poros (Porosimetría de Intrusión de Mercurio) de este material se resumen en la tabla 8.1 y figura 8.6.

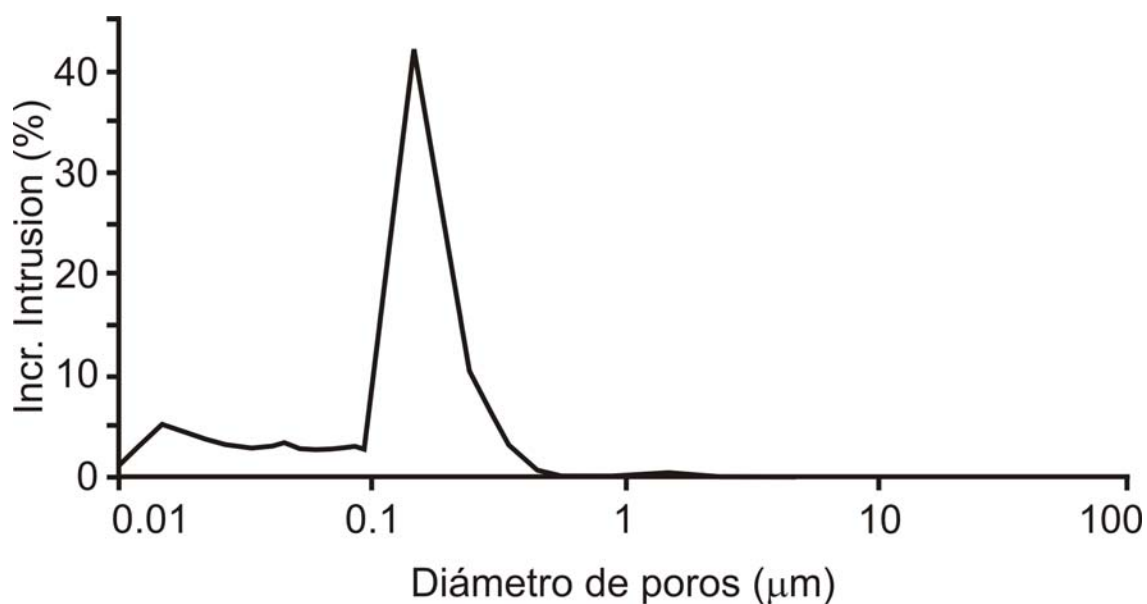


**Figura 8.5:** Fotomicrografías con nícoles paralelos (a) y cruzados (b) de la Piedra Bateig Azul.



**Tabla 8.1:** Datos petrofísicos e Porosimetría de Intrusión de Mercurio para muestras de Piedra Bateig Azul.

<b>L</b>	$74,7 \pm 0,9$
<b>a*</b>	$-0,7 \pm 0,1$
<b>b*</b>	$5,5 \pm 0,3$
<b>Índice de blanco (WI)</b>	$28,6 \pm 2,0$
<b>Índice de amarillo (YI)</b>	$10,1 \pm 0,5$
<b>Saturación al agua (% peso)</b>	$5,48 \pm 0,08$
<b>Porosidad accesible al agua (%)</b>	$12,60 \pm 0,10$
<b>Compacidad</b>	0,87
<b>Porosidad accesible al mercurio</b>	14,4
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,27
<b>Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,66
<b>Superficie específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	5,53
<b>Mediana del tamaño de poros (μm)</b>	0,14
<b>Media del tamaño de poros (μm)</b>	0,05
<b>Velocidad de ultrasonidos Vp (m/s)</b>	$3770 \pm 30$
<b>Índice de anisotropía</b>	5,92

**Figura 8.6:** Distribución de la porosidad en la biocalcarenita Bateig Azul.



### 8.3. Ensayo de envejecimiento por sales en convección y radiación.

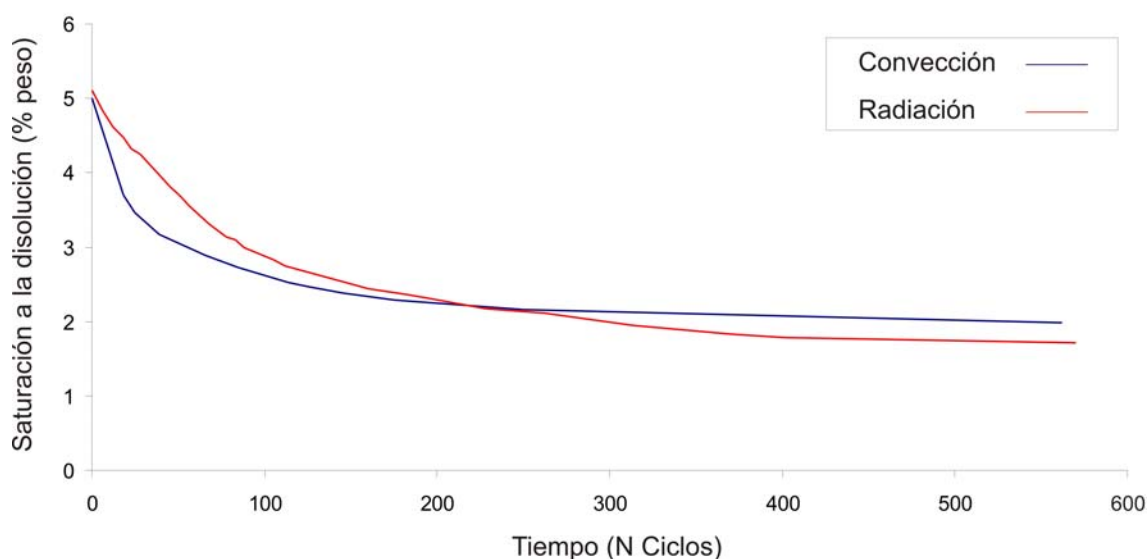
Con respecto a la evolución del peso a lo largo del ensayo de las muestras, para homogeneizar las observaciones en lugar del peso absoluto se ha representado la saturación al agua:

$$\frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100$$

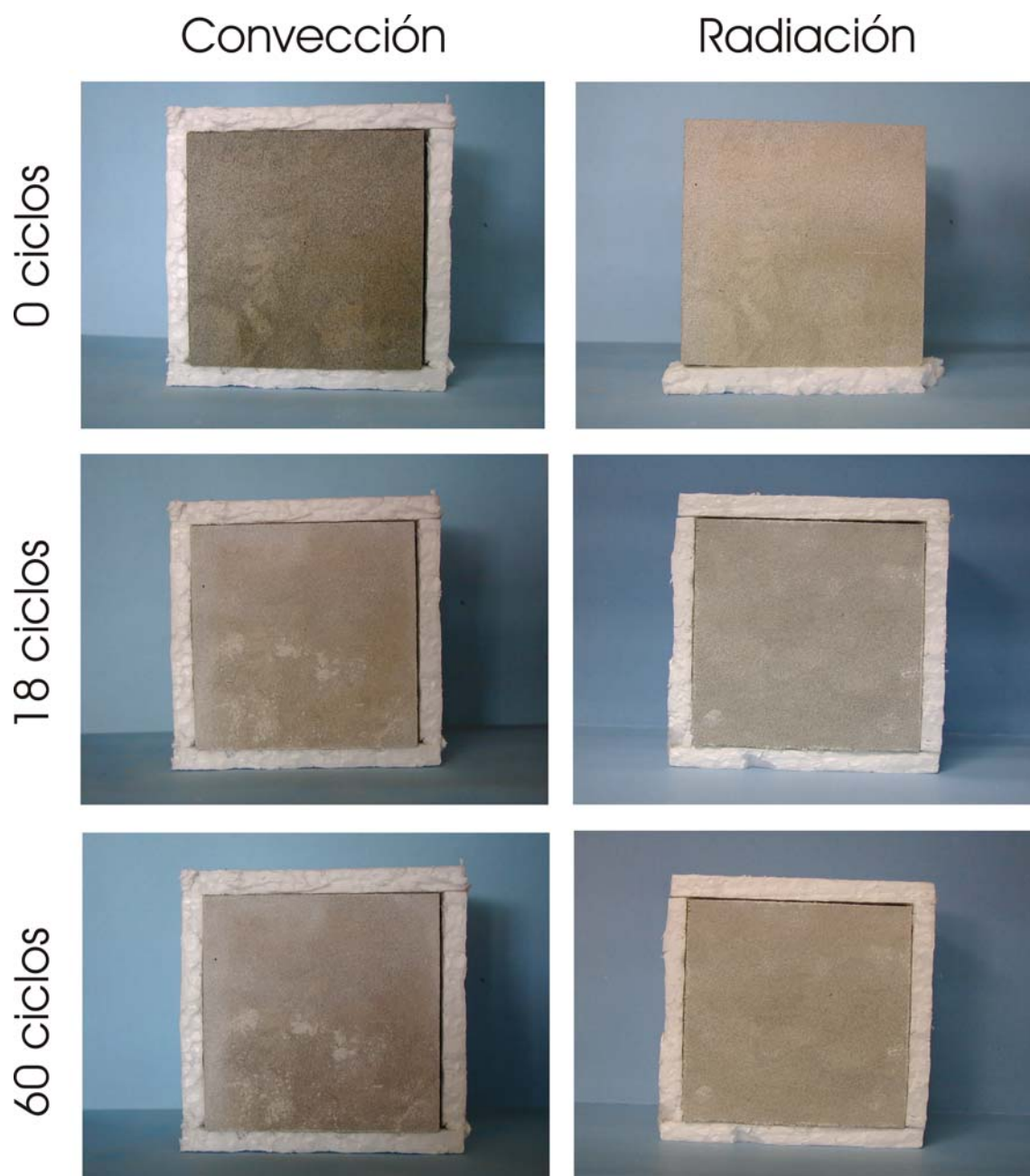
Donde  $P_0$  es el peso de la muestra seca y  $P$  el peso de la muestra saturada en cada uno de los puntos del ensayo. La tabla 8.2 recoge los pesos de las muestras ensayadas. La muestra no se extrajo de la cubierta de poliestireno expandido hasta el final del ensayo por lo que en los pesos tomados se tuvo en cuenta el peso de la cubierta descontándolo del valor obtenido en las pesadas.

**Tabla 8.2:** Peso de las muestras ensayadas en convección (SC) y radiación (SR).

	SC	SR
<b>Peso seco (g)</b>	2378,9	2313,7
<b>Peso cubierta poliestireno (g)</b>	25,8	17,8
<b>Peso muestra saturada y cubierta de poliestireno (g)</b>	2523,6	2449,7
<b>Saturación inicial a la disolución (% peso)</b>	5,0	5,1



**Figura 8.7:** Pérdida de peso registrada en los ensayos de convección y radiación.

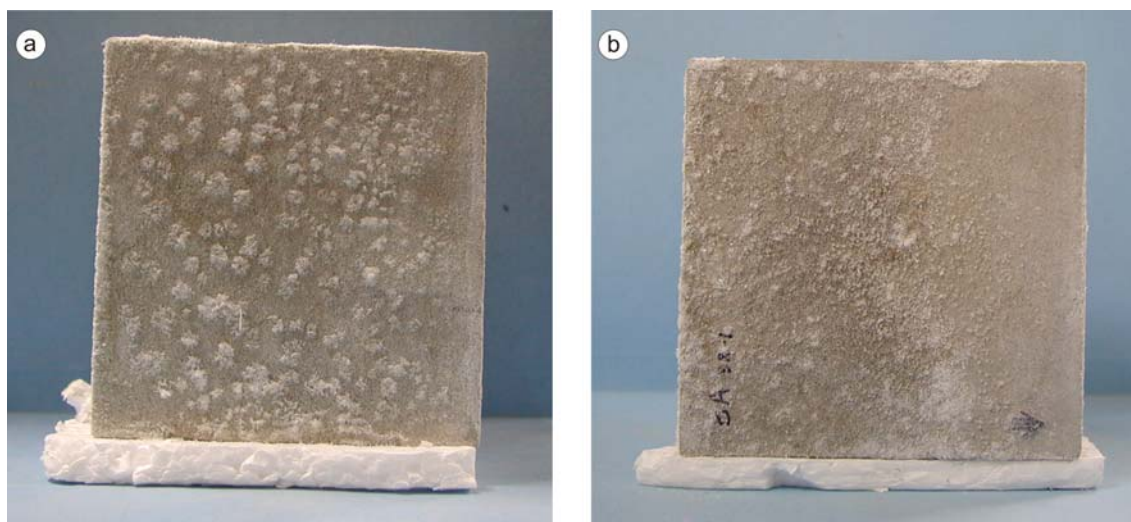


**Figura 8.8:** Aspecto visual de la superficie calentada a lo largo de los ciclos de convección y radiación.

La figura 8.7 muestra la evolución de la saturación a la disolución de las muestras a lo largo del ensayo. Esta evolución refleja la velocidad de evaporación del material en cada uno de los ensayos. El tiempo de inflexión en el ensayo de convección es de 72 horas (18 ciclos), mientras que en el ensayo de radiación este valor se eleva hasta 400 horas (100 ciclos). En el caso del régimen de calentamiento por radiación, la velocidad de evaporación es inferior en los primeros ciclos que en el del calentamiento por

convección (hasta el tiempo de inflexión del ensayo de convección). A partir de ese momento la velocidad de evaporación es mayor en el calentamiento por radiación que en el de convección. También se observa que en el calentamiento por convección se alcanza antes un valor constante de pérdida de peso, resultando para un número alto de ciclos mayor la pérdida de peso registrada en el régimen de radiación que en el de convección.

Con respecto al aspecto visual de la muestra a lo largo de los ciclos (Figura 8.8), se observa que los principales cambios superficiales se producen a lo largo de los primeros ciclos. Las muestras ensayadas con ciclos de convección presentan eflorescencias de NaCl afectando aproximadamente al 50 % de la superficie de la muestra. En las muestras ensayadas con ciclos de radiación, la superficie que presenta eflorescencias no alcanza el 1 % de la superficie. Las zonas donde se observan eflorescencias están relacionadas con marcas producidas durante la manipulación de la muestra antes del comienzo del ensayo. Tras el ciclo 18 los cambios que se observan son de mucha menor magnitud y no se observa un cambio apreciable en el área con eflorescencias en la superficie calentada. Se observa un aumento del espesor de las eflorescencias en las muestras calentadas por convección y un aumento de la rugosidad superficial en las muestras calentadas por radiación.



**Figura 8.9:** Perfil de las muestras tras los ensayos de convección (a) y radiación (b) una vez retirada la cubierta de poliestireno. La superficie calentada durante los ensayos se sitúa a la derecha de las imágenes. La arista de las muestras corresponde a 10 cm.

Una vez terminados los ensayos y retirada la cubierta de poliestireno expandido se observa un perfil de sales diferente en los casos de convección y radiación (Figura 8.9). En ambos casos, en los laterales de las muestras correspondientes a las zonas alejadas de la cara calentada, se observan una serie de morfología aciculares concentradas en unos pocos núcleos. Mientras, en las zonas más cercanas a la cara calentada, se observa una mayor homogeneidad sin estas morfologías aciculares macroscópicas. En el caso de la muestra calentada por convección aparte de las eflorescencias en superficie se aprecia una capa en el exterior del material de  $0,36 \pm 0,07$  cm de aspecto homogéneo y sin núcleos de cristalización visibles macroscópicamente. El resto del material presenta morfologías aciculares de NaCl en forma de rosas dispersas.

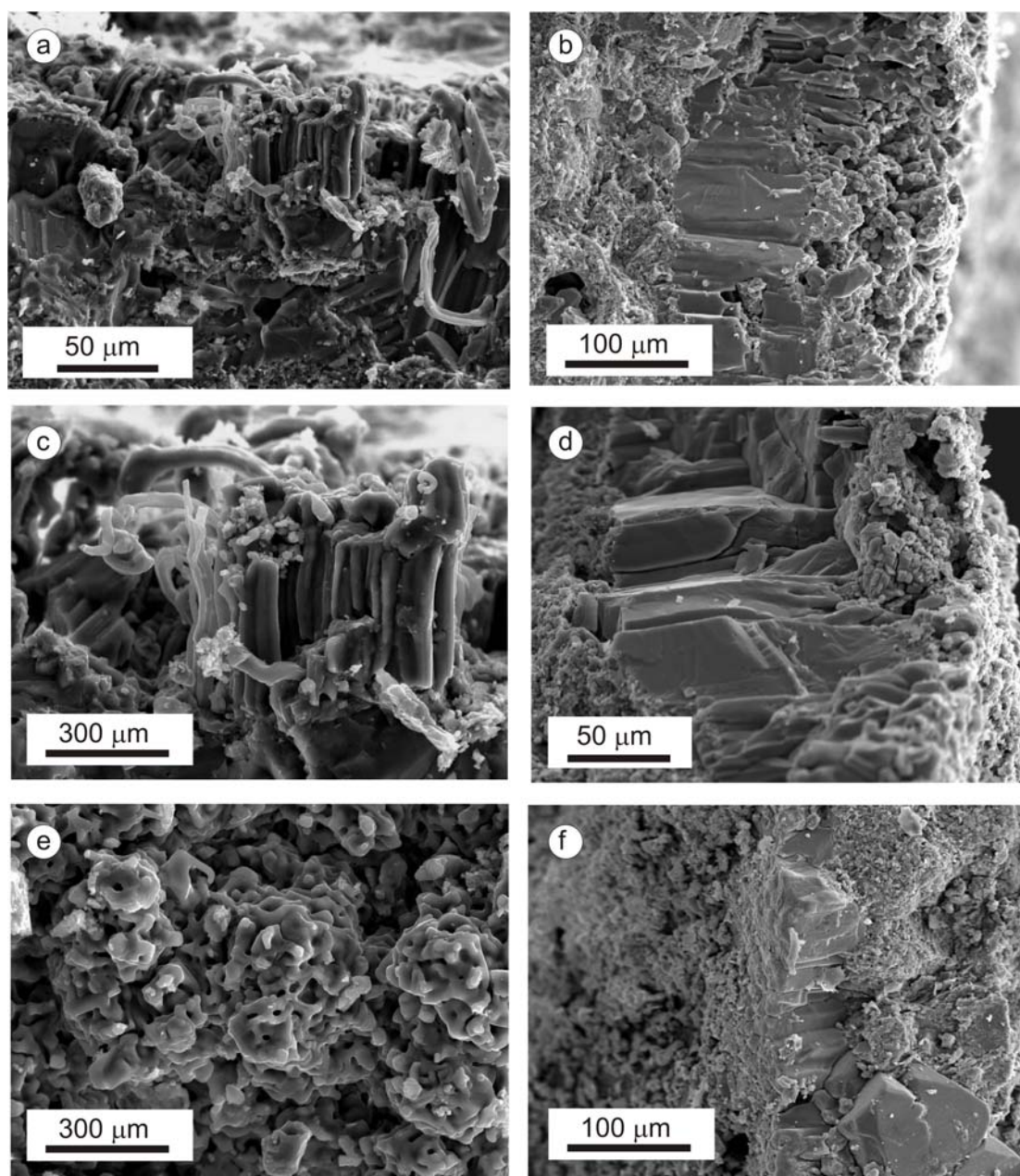
En el perfil de las muestras calentadas por radiación se observa una capa homogénea de sales que ha cristalizado a unas décimas de milímetro de la superficie en forma de subeflorescencias, generando un plano de despegue de la parte más externa con respecto al resto del material. Hacia el interior, se observa una zona homogénea de unos 2,5 cm de características similares a la zona externa de la muestra calentada por convección. Entre los 2,5 y los 3,6 cm de profundidad se presenta una capa de transición en la que aparecen numerosas acumulaciones de incipientes cristales aciculares de NaCl. A partir de 3,6 cm de profundidad se observan acumulaciones de cristales aciculares de mayor tamaño y morfología similar a los producidos en el calentamiento por radiación; sin embargo, en este caso aparecen en mayor número.

En las observaciones de microscopio electrónico de barrido (Figura 8.10) se observan diferencias morfológicas importantes entre los cristales de NaCl cristalizados en regímenes de convección (Figura 8.10a, c y e) y radiación (Figura 8.10b, d y f). En el caso del calentamiento por convección los cristales aparecen formando una eflorescencia con un espesor medio de unas 100  $\mu\text{m}$ . Se observan dos tipos de cristales: primero, unos más homométricos situados en las zonas de contacto con la superficie de la roca (Figura 8.10a) y nucleados sobre otros cristales en la parte más externa de la capa salina, y segundo, los más frecuentes de morfologías aciculares, estriados longitudinalmente y a menudo curvados (Figura 8.10a y c). En la observación en planta de la superficie calentada, los cristales presentan signos de disolución (Figura 8.10e)

Los cristales formados en las muestras calentadas por radiación forman una capa subeflorescente a unas 100  $\mu\text{m}$  de la superficie calentada. Los cristales son columnares

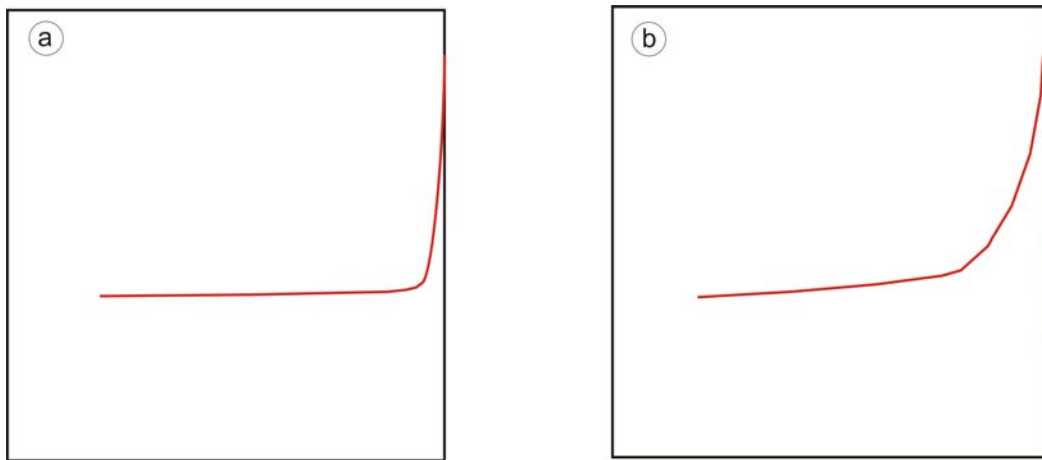


con el eje más desarrollado perpendicular a la superficie calentada (Figuras 8.10b y d) formando una “empalizada” de cristales de hasta 300  $\mu\text{m}$  de espesor. Los cristales presentan un zonado oscilante según esta dirección perpendicular a la superficie de la muestra. A partir del zonado se observa que las caras (001) son paralelas a la superficie calentada. La mayoría de cristales aparece nucleada sobre los granos del esqueleto, desplazando la capa superficial del material. En esta zona ocupada por los cristales solo se observan granos del esqueleto del material como inclusiones de las sales.



**Figura 8.10:** Imágenes de microscopio electrónico de barrido de la capa superficial de las muestras calentadas por convección (a, c, e) y por radiación (b, d, f). Las figuras a-d corresponden a secciones perpendiculares a la superficie calentada, mientras que las imágenes e y f muestran la superficie exterior de los cristales.

A partir de los datos macroscópicos y de microscopía electrónica se puede establecer un modelo cualitativo aproximado de la distribución de las sales en el seno del material pétreo (Figura 8.11). En el caso de la muestra calentada por convección el máximo de precipitación se sitúa en la superficie externa del material y desciende muy rápidamente hacia el interior. En el caso del calentamiento por radiación, el máximo de precipitación de la halita se sitúa de manera subsuperficial, descendiendo luego hacia el interior de manera más progresiva.



**Figura 8.11:** Modelo aproximativo de la distribución de la halita en las muestras calentadas por convección (a) y por radiación (b), siendo la arista del cubo 10 cm. La línea roja corresponde a la cantidad de halita precipitada en la muestra. La cantidad de NaCl precipitado está representada como valores relativos y referenciada con respecto al eje vertical del esquema.

Este comportamiento diferencial encuentra su explicación en el diferente mecanismo de evaporación que implica el distinto régimen de calentamiento y en el gradiente de temperaturas que se produce en el seno del material. En el caso de la convección, la evaporación se produce por un mecanismo físico de transporte de aire que se suma al aumento de la temperatura, mientras que en el caso de la radiación, no existe este movimiento de aire en la superficie. Por otro lado, como se observó en el capítulo 7, el calentamiento cíclico por convección varía la temperatura del material apenas en los primeros milímetros, mientras que el calentamiento cíclico por radiación produce un régimen complejo de temperaturas en el interior con gradientes de temperatura mayores que afectan mayor espesor de material.

Las diferencias entre ambos casos están muy condicionadas por el comportamiento de las soluciones en los primeros ciclos de calentamiento – enfriamiento, dado que una

vez que se han formado los primeros núcleos de halita, es más favorable energéticamente el crecimiento de estos que la formación de nuevos núcleos. De tal manera, el resultado que se observa finalmente es, en cierto modo, reflejo directo de las condiciones en los primeros ciclos del ensayo.

Al principio, el secado se produce en la parte más superficial proviniendo el aporte de la solución del movimiento capilar de las zonas más internas del material. En el caso del calentamiento por convección este proceso está condicionado por la circulación de aire que implica este sistema de calentamiento. Inicialmente, al existir un movimiento de aire en la superficie la salmuera se evapora más rápidamente que en el calentamiento por radiación. Esto se ve reflejado en las curvas de evaporación en las cuales en los primeros ciclos la velocidad de evaporación en el calentamiento por convección es más rápida que en el calentamiento por radiación.

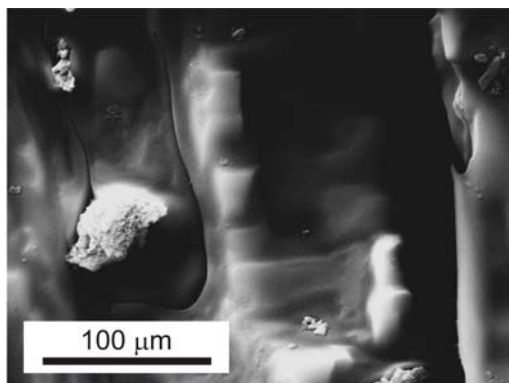
Como se vio en los perfiles de temperatura obtenidos en el capítulo 6, el calentamiento por convección es menos efectivo, siendo más lento el aumento de temperatura en el material y afectando a un menor espesor de roca que el calentamiento por radiación. Así aunque la temperatura ambiente para estos ciclos llega a 37 °C, el material nunca alcanza este valor y, de manera general, se mantiene más frío que en el caso del material calentado por radiación.

De tal manera el proceso principal que sufre la roca por el que la salmuera pueda alcanzar la sobresaturación necesaria para formar cristales es la evaporación de la solución en la superficie del material. Esto condiciona que, cuando se calienta la muestra por convección, la salmuera tienda a alcanzar la sobresaturación en la superficie externa del material y por tanto los cristales de halita crezcan principalmente como eflorescencias sobre la roca. La observación del perfil de la roca confirma que sólo en el primer medio centímetro de roca se han alcanzado altas sobresaturaciones (alta densidad de núcleos (cristales) y formas cristalinas aciculares de crecimiento rápido) mientras que en el resto del material la densidad de núcleos a partir de los cuales se han formado cristales se reduce drásticamente.

En el régimen de calentamiento por radiación el aumento de temperatura en el material es mayor y más rápido. Como resultado, la evaporación de la solución en la superficie no se ve favorecida por un proceso de circulación de aire y, aunque la temperatura ambiente en los ensayos llegue a 37 °C, la temperatura de la superficie del

material llega a exceder ampliamente este valor. El calentamiento rápido favorece que la zona más superficial se seque más rápidamente que la capacidad que la solución en el interior del material tiene para circular por capilaridad. La roca se seca, por tanto, mediante transferencia de vapor de agua. La menor velocidad de evaporación inicial y el sobrecalentamiento de la superficie hace que las condiciones termodinámicas para que se nucleen cristales de halita se pueden dar en la zona subsuperficial. Los primeros cristales nuclean en los poros en lugar de en la superficie. Una vez que se han nucleado estos primeros cristales, la solución tenderá a producir el crecimiento de estas subeflorescencias en lugar de producir nuevos cristales en la superficie exterior.

Las subeflorescencias formadas con radiación tienen morfologías subeuhedrales que sugieren mecanismos de crecimiento de tipo 3D (Sunagawa, 1981) y por tanto implican sobresaturaciones moderadas. La observación en perfil de la roca muestra que en el caso del calentamiento por radiación la región con sobresaturaciones moderadas afecta a un espesor de muestra considerable con respecto a lo sucedido en el material calentado por convección.



**Figura 8.12:** Imagen de microscopio electrónico de barrido en modo de electrones retrodispersados de cristales de halita crecidos en régimen de calentamiento por radiación donde se observa el zonado de los cristales.

La cristalización se produce por pulsos, que coincidirían con los distintos pulsos de circulación de la solución hacia la superficie producida por los ciclos de calentamiento. Así por ejemplo en el caso de las subeflorescencias producidas en regímenes de radiación (Figura 8.12) se observa esta ciclicidad. Un primer cristal euhedral de halita crece nucleado heterogéneamente sobre la pared de un poro. Su crecimiento cesa y sufre una leve disolución (expresada

como el curvado cóncavo de las superficies del cristal que se observa en los zonados o en la figura 8.10e). Esta disolución estaría producida por la circulación de un pulso de solución subsaturada en NaCl. Este cristal continúa creciendo por pulsos con una magnitud, obtenida de la medida de los zonados, de  $23 \pm 5 \mu\text{m}$ . Esta ciclicidad del crecimiento multiplica los efectos destructivos que puede tener la sal.



Como se observa en estos ensayos, el régimen de calentamiento influye notablemente en la dinámica de cristalización de las sales en los materiales porosos. En el caso del cloruro sódico el calentamiento por radiación favorece la formación de subeflorescencias en el material. El cambio de régimen de calentamiento produce un efecto similar en la dinámica de cristalización al que puede causar una impureza en la salmuera. Así, por ejemplo, en el cloruro sódico existen varias impurezas que actúan inhibiendo la cristalización o modificando el habito de crecimiento (Rodríguez-Navarro et al., 2002).

Esta diferencia entre los resultados obtenidos con calentamiento por convección y radiación tiene una implicación clara en lo que se refiere al diseño de los ensayos de envejecimiento acelerado por sales. Los métodos tradicionales de ensayo no contemplan el calentamiento por radiación de las muestras, lo que en este caso supone una infravaloración de los estimadores de durabilidad, ya que la cristalización de sales en forma de subeflorescencias es más destructiva que como eflorescencias.

Al eflorescer una sal, se produce un deterioro estético por la capa de sales que se forma en el exterior del material, sin embargo la cristalización de la sal no produce una presión notable al no cristalizar en el interior de los poros. En el caso de una subeflorescencia, la cristalización de la sal se produce en el interior de los poros, lo que genera una presión contra las paredes de los mismos y, como se ha visto, puede provocar la descohesión de la capa superficial del material.

Las diferencia existentes entre ambos regímenes de calentamiento, demuestran las relaciones indicadas por algunos autores entre tasas de calentamiento rápidas y la formación de desplazados por cristalización de sales y tasas de calentamiento bajas y la formación de descamados y disgregación granular (Smith et al., 1987; Smith y McGreevy, 1988;). De tal manera, la utilización de un régimen de calentamiento realista y apropiado es el primer paso hacia la replicación y comprensión real de los mecanismos de deterioro por sales, en vez de simplemente, “destruir muestras en el periodo de tiempo más corto posible” (Smith et al., 2005; p. 214).

A esto se suma que, al ser las temperaturas en el seno del material mayores que si se calientan las muestras por convección, la dilatación diferencial de las sales puede aumentar el efecto disruptivo de las mismas. Como se recogía en la figura 8.1 el coeficiente de dilatación térmica del cloruro sódico es muy superior al de la calcita para

---

todo el rango de temperaturas. La situación de la sal en el interior de los poros más este efecto de dilatación diferencial acelerará el deterioro del material con respecto a la velocidad que se produzca en calentamientos en régimen de convección. Esto se observa en los materiales ensayados en los cuales en el calentamiento por convección las muestras no presentan la disrupción del esqueleto de la roca que presenta la muestra calentada por radiación.

Los resultados obtenidos aconsejan el uso de metodologías de ensayo de sales que tengan en cuenta fuentes de calentamiento por radiación y por tanto la dinámica de secado asociada con este régimen y la anisotropía térmica producida en el seno del material.

## **9. Influencia del microambiente térmico en el deterioro de edificios.**

Una vez realizado el estudio en el laboratorio de las variaciones de temperatura que se producen en una serie de materiales pétreos en un entorno de calentamiento por radiación en regímenes de temperaturas ambientales y su potencialidad para causar deterioro, se debe abordar el estudio de cómo estos procesos se pueden dar en el ambiente de un edificio.

Como se ha visto anteriormente en los capítulos 6 al 8, existen una serie de características superficiales de los materiales pétreos como el albedo, que condicionan la existencia de diferencias de temperatura a escalas que pueden llegar al nivel de granos minerales. De tal manera la existencia en un edificio de zonas adyacentes de mayor entidad con diferentes propiedades con respecto a la absorción de radiación y la conducción del calor puede generar cambios microclimatológicos en el edificio que a su vez pueden producir diversos procesos de deterioro, aparte de los efectos mecánicos que las diferencias de temperatura pudieran causar.

No existe un acuerdo generalizado sobre a qué escala aplicar el término *microclimatología* y diferentes autores lo han utilizado para referirse a diversas escalas de los cambios ambientales que afectan a un afloramiento o a un edificio. Así podemos encontrar el término *microclimatología* a escalas que abarcan desde un edificio o monumento en su conjunto (p.ej. Bernardi y Vicenzi, 1993) hasta una zona muy concreta del mismo (p.ej. Fort et al., 2003, 2004). Por ello en este caso se mantendrá el término general de *microclimatología* atendiendo a la definición de Camuffo (1998) según la cual el concepto de *microclimatología* se refiere a “todo el ambiente que sea necesario estudiar para conocer los factores que tienen una influencia directa en el estado físico del monumento y sus interacciones con el aire y los objetos circundantes”.

Las diferentes condiciones microclimatológicas de las diversas fachadas o zonas de un edificio condiciona en muchos casos el grado de deterioro que este muestra cada una de sus partes. Esta diferencia en las condiciones puede venir dada por factores “naturales”, como por ejemplo la orientación de las fachadas, o por factores debidos al diseño de sus elementos constructivos o a un deficiente estado de los mismos, como por ejemplo la existencia de elementos que arrojen agua directamente sobre las fachadas.



**Figura 9.1:** Ensuciamiento diferencial debido a diferencias térmicas y circulación de aire.

Las diferencias de temperatura en un edificio pueden condicionar aspectos como las pautas de ensuciamiento por las corrientes que generan los gradientes entre zonas cálidas y frías del edificio y que arrastrarán las partículas de contaminación.

Como se ha dicho antes, esto puede producirse a escala de todo el edificio debido a factores inherentes de su orientación, pero también puede deberse a factores de diseño de ciertos elementos del mismo, como se observa en la figura 9.1 en la que la instalación de un elemento calefactor es el causante de las corrientes que dan lugar a un ensuciamiento diferencial del muro donde está instalado.

Si tomamos el concepto de microambiente en esta escala que se reduce a un muro o parte de un muro, las diferencias térmicas, en este caso causadas por la radiación solar, pueden ser también causantes de deterioro mecánico debido a los procesos discutidos en anteriores capítulos. Por esta razón es importante enfocar el estudio microclimatológico del edificio no solo en la evolución microambiental y la posible existencia de diferencias térmicas para diferentes orientaciones de los elementos, sino además valorar la existencia de diferencias térmicas en zonas muy concretas del edificio, debido a las diferentes propiedades de los materiales y su respuesta al calentamiento solar. De esta manera mediante una escala de observación más detallada se puede valorar la influencia que pueden tener las diferencias térmicas en el deterioro de los materiales del edificio.

El estudio de la evolución térmica de los materiales situados en un edificio patrimonial incluye una limitación con respecto a las simulaciones realizadas anteriormente en el laboratorio, dado que se debe interferir lo menos posible en estos edificios. Así, por ejemplo, es inviable el estudio de los perfiles de temperaturas que se producen en el interior del material, pues esto requeriría la destrucción de parte del mismo a través de la utilización de taladros para situar las sondas de temperatura. De esta manera, el estudio térmico de estos materiales se debe basar en temperaturas superficiales obtenidas de manera no destructiva.

Por tanto, para este estudio del comportamiento térmico de los materiales en edificios patrimoniales y su posible influencia en el deterioro de los mismos se realizó un conjunto de mediciones de temperaturas superficiales en dos edificios de la ciudad de Madrid. Se llevaron a cabo dos tipos de mediciones: el primer tipo consistió en la medida de la temperatura superficial en varios puntos seleccionados en las distintas fachadas de los edificios y el segundo en la obtención de una malla de puntos de datos de temperaturas en un área concreta de cada uno de los edificios con el objetivo de obtener un mapa de temperaturas superficiales en esas zonas determinadas.

Los edificios que se seleccionaron para este propósito fueron el *Panteón de Hombres Ilustres*, edificio de Fernando Arbós acabado en 1899 y el edificio de la *Sede Central del Consejo Superior de Investigaciones Científicas* construido en 1943 según proyecto de los arquitectos Fisac y Fernández Vallespín. El primer edificio fue declarado Bien de Interés Cultural (BIC) en 1992, mientras que el segundo, incluido dentro de todo el conjunto de los *Altos del Hipódromo* está en proyecto de catalogación como BIC.

Estos edificios se seleccionaron por presentar una serie de características constructivas o composicionales de los materiales, que los hacían especialmente susceptibles a sufrir deterioro inducido por la temperatura como factor primordial en, al menos determinadas situaciones del edificio. También favoreció su selección el hecho de que, poseyendo un valor arquitectónico y patrimonial reconocido, su construcción fuera lo suficientemente reciente como para discernir más claramente si ciertas morfologías de deterioro pudieran estar inducidas por procesos de fatiga relacionados con el comportamiento térmico diferencial de materiales adyacentes o de zonas contiguas del mismo material. El estudio de edificios patrimoniales relativamente recientes también permite valorar la importancia de este factor a media escala desde el punto de vista de la arquitectura (desde los 60 años que hace que se terminó el edificio central del CSIC hasta los 105 que pasan desde la conclusión del Panteón de hombres ilustres).

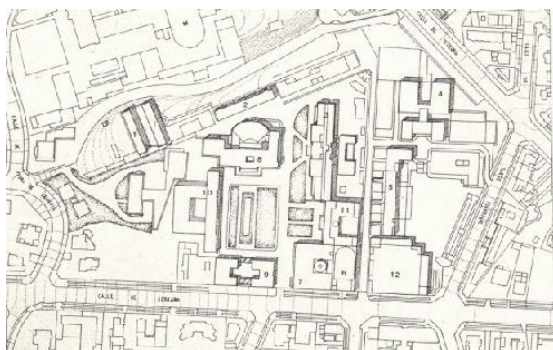
Dentro de que individualizar completamente un agente de deterioro es imposible, al existir una acción sinérgica de los mismos, cuanto más tiempo haya estado expuesto el edificio, más difícil sería discernir en que proporción las diferencias térmicas pudieron inducir deterioro en mayor medida que otros agentes, por ello se rehusó seleccionar

edificios de mayor antigüedad. Además se seleccionaron edificios contruidos con materiales poco porosos para minimizar el efecto de la humedad.

En el caso del edificio central del CSIC, construido con granito rico en enclaves microgranulares, la investigación se centro en la existencia de morfologías de deterioro del tipo micro-desplacado y descamado de forma diferencial en estos enclaves con respecto al granito encajante. El Panteón de Hombres Ilustres está construido principalmente con una combinación de caliza blanca y negra en hiladas intercaladas. La atención se centró en la influencia que pudieran tener las diferencias litológicas de los materiales en el deterioro por causa térmica de las aristas de los sillares que produce el redondeo de los mismos, lo que conduciría a considerar estos materiales adyacentes como incompatibles.

### 9.1. Deterioro de enclaves microgranulares y microambiente térmico: Pabellón Central del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

El conjunto de edificios en el que se incluye la sede central del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) surge a partir del patronato presidido por Ramón Menéndez Pidal para crear una residencia para la *Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas* (organismo creado en 1907 y antecedente del actual CSIC).



**Figura 9.2:** Plano del complejo de edificios de los Altos del Hipódromo

En 1911 el estado cede unos terrenos en los denominados *Altos del Hipódromo* entre las actuales calles Serrano y Castellana de la ciudad de Madrid (Luego llamados también *Colina de los Chopos* a partir de que los denominara así Juan Ramón Jiménez). El plan director y proyecto de urbanización inicial de este complejo fue realizado por los arquitectos

Estanislao Pérez Pita y Jerónimo Junquera.

En una primera fase, se construyeron la Residencia de Estudiantes (Antonio Flórez Urdapilleta y Francisco Javier de Luque), el edificio de la “Fundación Rockefeller” (actual Instituto de Química-Física Rocasolano) de Luis Lacasa Navarro y Manuel Sánchez Arca, el Auditorio de la Residencia (Carlos Arniches Moltó y Martín Domínguez Esteban), así como algunos de los edificios que actualmente pertenecen al Colegio Ramiro de Maeztu (Carlos Arniches Moltó entre otros).

Después de la creación del CSIC propiamente dicho en 1939, como heredero de la Junta para la ampliación de Estudios disuelta un año antes, Miguel Fisac construye a partir de 1940 la iglesia del Espíritu Santo sobre las ruinas del antiguo auditorio, destruido en la guerra civil, el Laboratorio de Geología (actual Instituto de Ciencias Medioambientales), el Instituto de Optica y el **Pabellón Central** (en colaboración con Ricardo Fernández Vallespín). También se construye el Archivo Histórico Nacional (Martínez Chumillas). El resultado actual tras las diferentes fases es un conjunto de edificios realizados por algunos de los arquitectos españoles más prestigiosos de la primera mitad del siglo XX.



**Figura 9.3:** Edificio del Pabellón Central del Consejo Superior de Investigaciones Científicas construido en 1943 por Miguel Fisac y Ricardo Fernández Vallespín

El Pabellón Central se encuentra situado en la zona más occidental de la plaza formada en el centro del complejo de edificios de los *Altos del Hipódromo* a una altitud de unos 700 metros sobre el nivel del mar, y con su fachada principal, cuyo plano se inclina pocos grados del norte hacia el este, mirando hacia el interior de este complejo.

El Pabellón Central del CSIC (figura 9.3) está construido, además de otros materiales no pétreos, con dos de los materiales más tradicionales de la arquitectura madrileña: El granito o *piedra berroqueña* de la sierra norte de Madrid y la Caliza de Colmenar. La caliza de Colmenar se utilizó en los elementos ornamentales como los capiteles de las columnas de la entrada principal, o en elementos secundarios como los dinteles de las ventanas de esa misma fachada o de la fachada norte. El granito es el

material pétreo predominante y en las fachadas principal y norte se extiende a lo largo de toda la altura de la fachada, mientras que en las fachadas de la zona sur se reduce a un basamento de unos dos metros, mientras que el resto de la altura del edificio está acabada con un enfoscado de cemento. El granito utilizado procede de la sierra de Guadarrama, posiblemente de la zona de Alpedrete por sus características petrográficas entre las que se incluye la abundante presencia de enclaves microgranulares (Menduiña et al., en prensa)



**Figura 9.4:** Deterioro diferencial por diseño deficiente de elementos del edificio.

El estado de conservación de las fachadas del edificio es en general bueno aunque el granito presenta a menudo desplazados en las zonas más basales del edificio, causados en la mayoría de los casos por humedades, provocadas en algunas ocasiones por deficiencias en el diseño del edificio, como se observa por ejemplo en la figura 9.4 en la que un inadecuado desagüe de los aparatos de aire acondicionado. Al ser impermeable la acera que rodea el edificio se provoca una acumulación de agua en determinadas zonas que favorece que exista un mayor deterioro en esas zonas. Este tipo de desplazados no afecta diferencialmente a encajante y enclaves microgranulares, lo que se

observa fácilmente en algunos casos en los que el borde de la morfología de deterioro cruza la estructura del enclave microgranular sin cambios observables, como se observa en la figura 9.5a. Por otro lado se observan otro tipo de desplazados de un espesor mucho menor que afecta de manera diferencial, presentándose en el área del enclave pero no progresando hacia el exterior del mismo (figura 9.5b).

El estudio del deterioro de los enclaves microgranulares se circunscribió al basamento que ocupa los primeros dos metros de fachada, puesto que es el que es el único elemento que está construido con granito en todas las fachadas. En total esta área de estudio contiene unos 83 enclaves microgranulares, de los cuales aproximadamente el 25 % presenta algún tipo de deterioro. De entre los enclaves que presentan deterioro (22) el 34 % presenta esta morfología de deterioro en la cual el enclave está afectado



por un desplazado de pequeño espesor, mientras que el encajante circundante no presenta deterioro apreciable.



**Figura 9.5:** Diferentes morfologías de desplazados en enclaves microgranulares; independiente de la estructura (izq.) y confinado a la estructura (dcha.)

Se estudiaron enclaves microgranulares situados en las zonas Sur, Este y Norte del edificio, ya que la zona Oeste no presenta granito. La zona Este corresponde a la fachada principal del edificio que, como se ha comentado anteriormente, tiene una ligera inclinación con respecto al Norte (aproximadamente N 4 E). La zona Sur presenta tres fachadas, dos de ellas encarando al Sur y otra hacia el Este, mientras que la zona Norte corresponde a una única fachada.

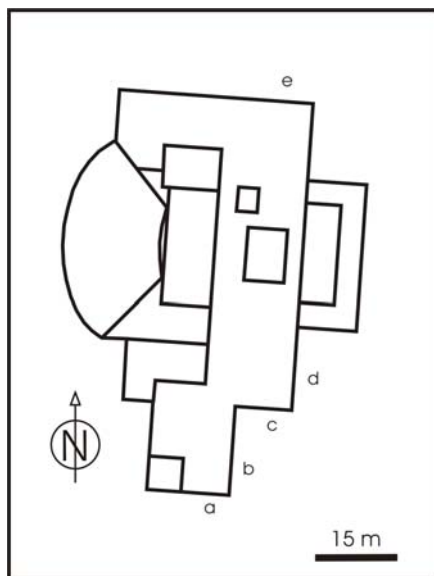
En total se seleccionaron 5 zonas de estudio, denominadas según la figura 9.6, b, c, d, e. En ellas se realizaron todas las medidas, tanto morfológicas como de temperaturas de enclaves y encajante.

Para la caracterización de los enclaves se midió su área y el color tanto del enclave como del encajante circundante para así determinar las diferencias cromáticas entre ellos. Para evaluar el posible origen diferencial de las morfologías de deterioro que afectan solo a los enclaves se llevaron a cabo 120 medidas de los espesores de los desplazados en los sillares, tanto de los que afectaban solo a los enclaves, o solo al encajante como de los que cruzaban las estructuras, para así discernir estadísticamente la posibilidad de un reflejo del proceso principal de formación en el espesor de los mismos.

Se realizaron dos tipos de medidas de temperaturas superficiales: En el primer caso se midió la evolución diaria de la temperatura y la humedad en una serie de enclaves,

tomando un solo punto en el enclave y otro en el encajante adyacente, mientras que en el segundo se realizó una toma de medidas en forma de malla para conseguir un mapa de isotermas de una sección de un sillar con un enclave deteriorado.

Para el primer caso se seleccionaron 8 puntos (enclaves) en las diferentes fachadas del edificio denominados E1, E2... E8, según la siguiente distribución: E1 y E2 en el área de medida *a*, E3 y E4 en la *b*, E5 y E6 en la *c*, E7 en la *d* y E8 en la *e*. Se seleccionaron 4 series de dos días a lo largo de un año para realizar las medidas en estos enclaves desde el 22 de diciembre de 2003 al 23 de septiembre de 2004, escogiéndose alrededor de los respectivos solsticios y equinoccios de cada una de las estaciones por ser los días extremos y medios en cuanto a horas de insolación.

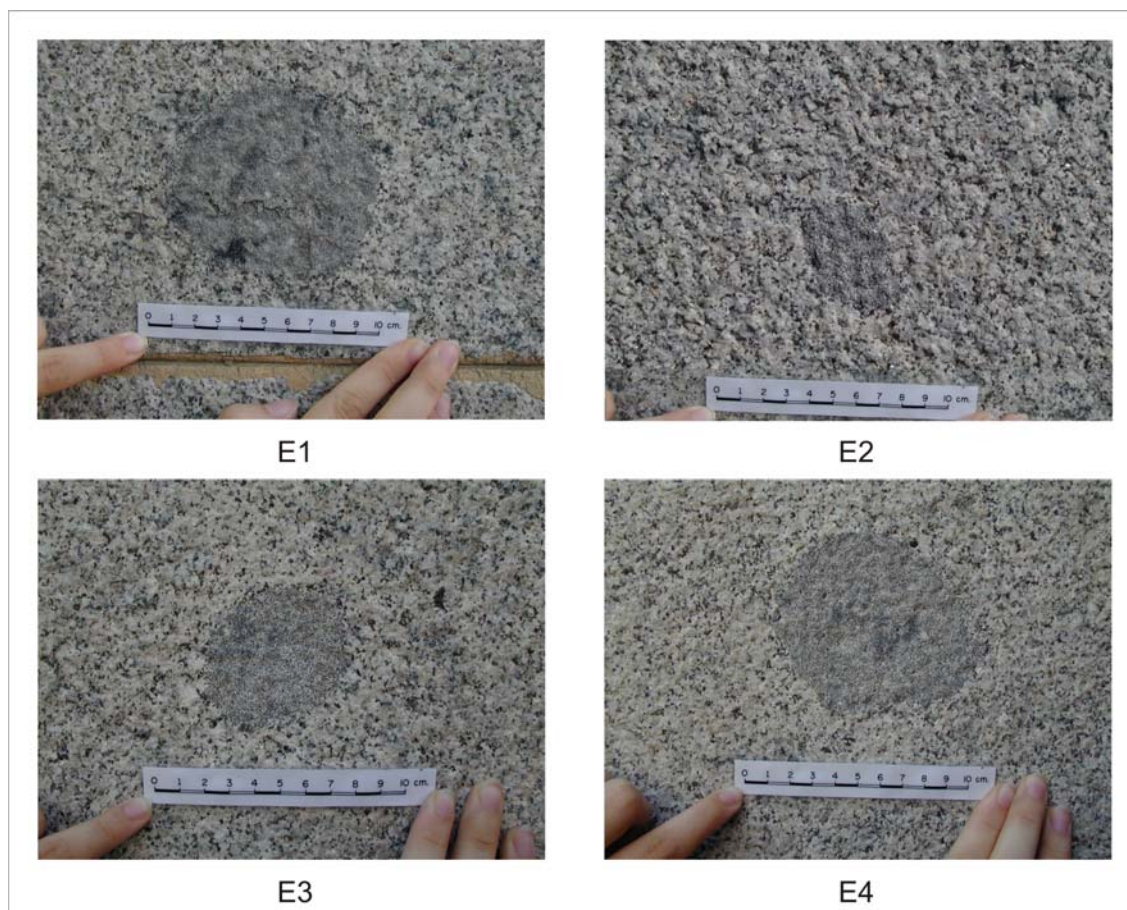


**Figura 9.6:** Planta esquemática del Pabellón Central del CSIC

Para homogeneizar los datos obtenidos en cada una de las estaciones se descontaron las correcciones estatales que incluye la hora local. Así las horas del día se expresan como “hora solar media del meridiano de Greenwich” (GMT). Sin embargo, para una mayor simplicidad no se realizó la corrección del meridiano local ni la de la ecuación del tiempo que incluye las pequeñas variaciones en el movimiento terrestre; corrección que, en todo caso, nunca excede los 17 minutos. Sin embargo, estos datos se introdujeron en un posterior modelo de la posición solar en cada uno de los días de las mediciones realizado con ordenador.

La toma de medidas de temperatura de superficie se realizó con un termómetro de infrarrojos *Raytek Raynger MX4* y las de humedad con un medidor de humedad *Protimeter Digital Mini*. Para ello se realizó una toma de medidas manual de la temperatura en cada uno de los puntos seleccionados en intervalos de 10 minutos en el periodo comprendido desde aproximadamente media hora antes de la salida del sol hasta poco después del ocaso de los días 22 de diciembre de 2003 y 22 de marzo, junio y septiembre de 2004. A estas medidas se les sumó una última medida realizada antes de la salida del sol de los siguientes días 23. Las medidas de temperatura incluyeron un

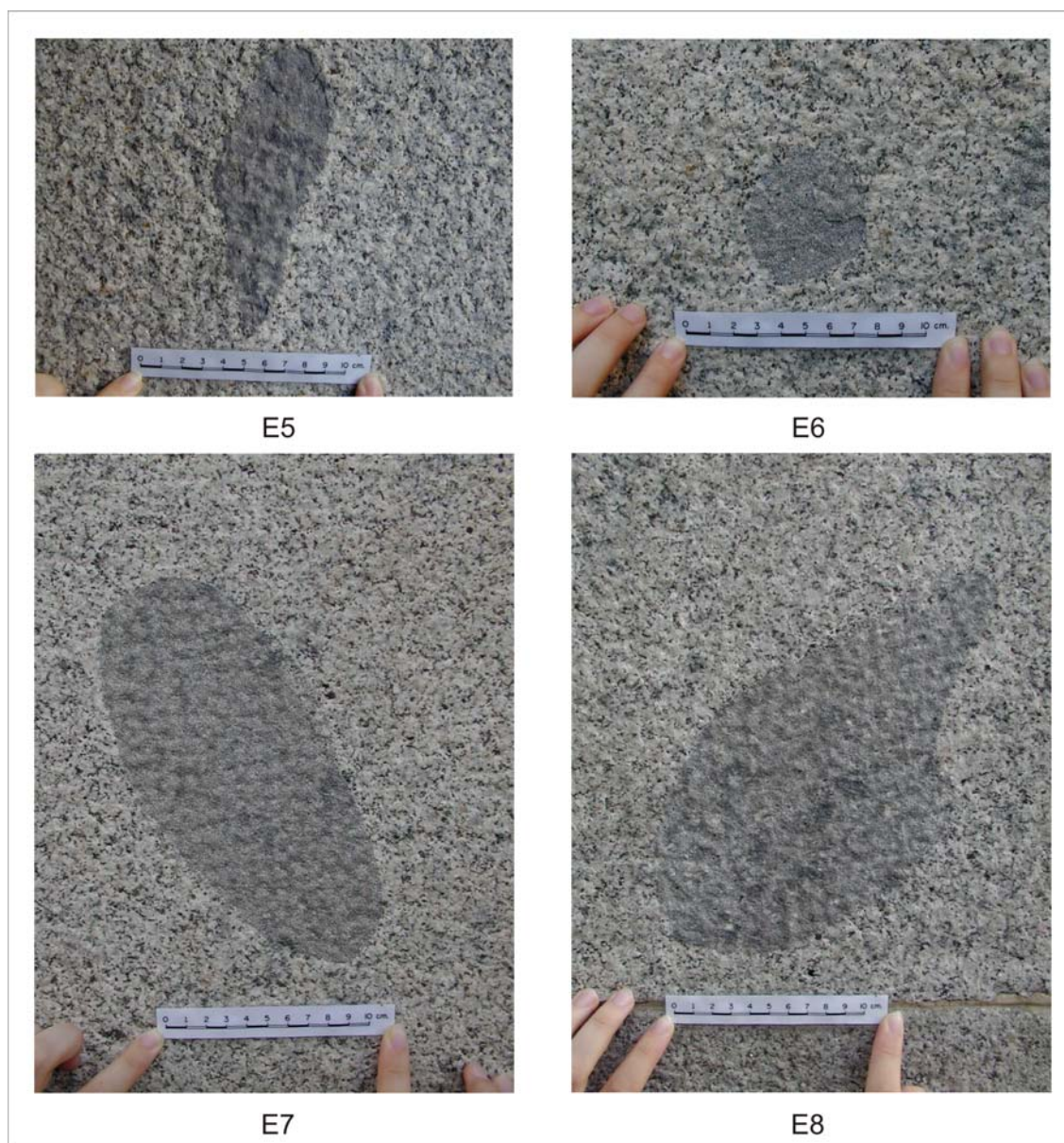
registro de las condiciones meteorológicas en el momento de medición, en lo que referente a existencia de sombras de edificios, ramas, hojas o nubes disminuyendo la energía incidente en la superficie medida, así como la existencia de viento que pudiera estar refrescando la superficie en el momento de la medida. La medida de la humedad de enclaves y encajante se realizó con el mismo procedimiento pero un intervalo de medidas de 1 hora.



**Figura 9.7:** Aspecto macroscópico de los enclaves E1 a E4 considerados en este estudio.

La temperatura y humedad ambiente se tomó mediante un registro automático con unos *Hobo Onset Data Logger Temp. y H6* a intervalos de 10 minutos. Estos sensores se colocaron durante los días de medición en una zona protegida en el exterior del edificio en la esquina formada por las fachadas denominadas *b* y *c*. Se seleccionó esta zona por concentrarse en ella muchos de los puntos de medida de enclaves, para recoger la distribución de temperaturas y humedad a escala de las cercanías del edificio.

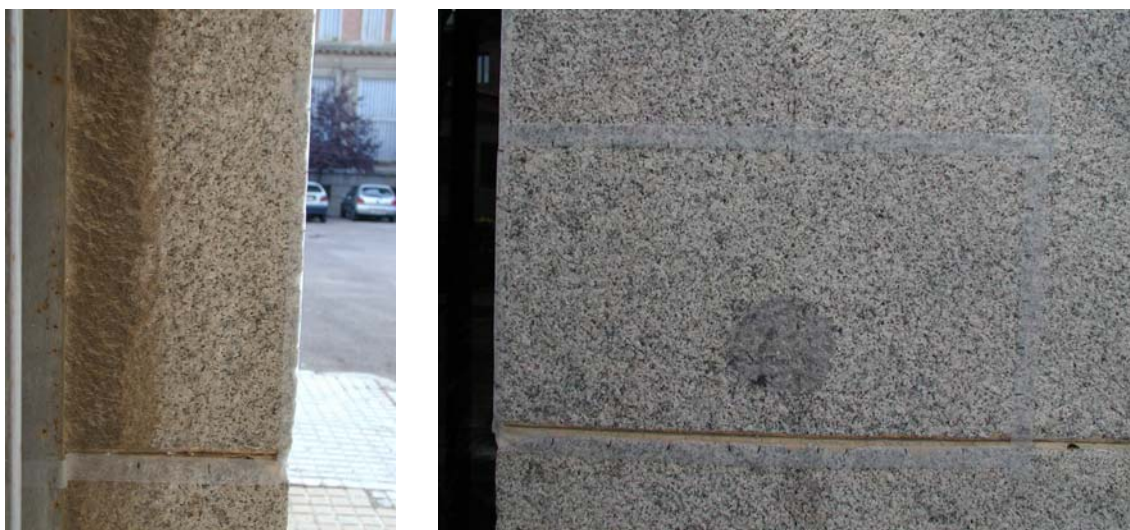




**Figura 9.8:** Aspecto macroscópico de los enclaves E5 a E8 considerados en este estudio.

Para realizar las mediciones de temperatura que permitieron realizar mapas de isotermas, se seleccionó una sección del sillar que contiene al enclave denominado E1. La sección se tomó de modo que el área seleccionada presentara una cara frontal expuesta a la insolación de 45 x 25 cm y un perfil de 15 x 25 cm no expuesto. Para realizar esta cartografía térmica se escogió un día cálido de verano sin nubosidad (24 de agosto de 2004) y se tomó una malla de 10 x 5 puntos en el frente del sillar y de 3 x 5 puntos en el perfil del mismo. Se tomaron medidas en cada uno de los puntos cada 10 minutos en un intervalo de tiempo que incluye todo el tiempo durante el que el sillar

recibía insolación directa. La figura 9.9 muestra la sección frontal y perfil seleccionados delimitados mediante cinta adhesiva.



**Figura 9.9:** Vista lateral (izq.) y frontal (dcha.) del área de sillar seleccionado para realizar el mapa de isotermas en la zona A, Enclave E1.

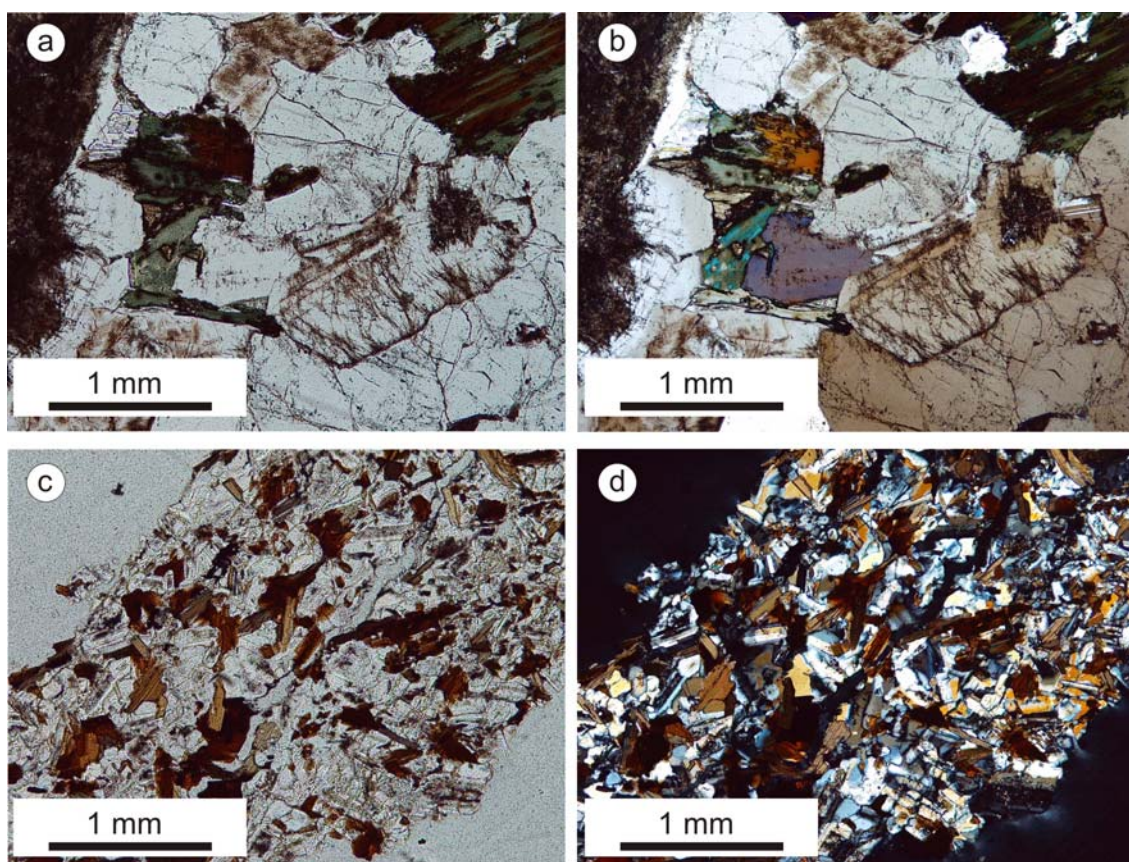
#### **9.1.1. Descripción de los enclaves microgranulares y su deterioro.**

El granito estudiado es un monzogranito equigranular hipidiomorfo de grano medio con cuarzo, feldespato potásico, biotita y plagioclasa como minerales principales y circón, apatito y cordierita como minerales accesorios. Entre los minerales secundarios se encuentra la moscovita que aparece como alteración de la biotita y como los agregados de sericita que alteran a las plagioclasas. También aparece clorita como alteración de la biotita y pinnita relacionada con la cordierita. Los feldespatos presentan abundantes texturas peritéticas y mirmequíticas. Las plagioclasas muestran zonados normales y oscilatorios y aparecen en casos como crecimientos en sineusis. El cuarzo presenta brechificaciones y cementa fracturas en algunos casos.

Los enclaves estudiados corresponden a enclaves microgranulares de composiciones tonalíticas. Al microscopio presentan texturas microporfídicas de grano fino, con los fenocristales comúnmente de tamaño milimétrico. Los fenocristales son fundamentalmente cristales idiomorfos de plagioclasa –que muestran zonados normales u oscilatorios–, biotita y, menos frecuentemente, cuarzo globular. La matriz presenta una textura intergranular definida por microlitos de plagioclasa, biotita, cuarzo y



ocasionalmente feldespato potásico en cantidades accesorias. La plagioclasa está poco zonada, desarrollando rebordes mirmequíticos en ocasiones. La biotita puede presentar un hábito subidiomorfo acicular o secciones alotriomorfas, incluyendo frecuentemente minerales opacos, circón y otros minerales accesorios. El cuarzo es intersticial, en general con extinción ondulante. El feldespato potásico es frecuente que presente exsoluciones peritíticas. En general presentan una alteración débil, manifestada en la ligera transformación a sericita de la plagioclasa y a clorita de la biotita.



**Figura 9.10:** Fotomicrografías del granito encajante (a, b) y los enclaves microgranulares (c, d) con nícoles paralelos (a, c) y cruzados (b, d)

La tabla 9.1 muestra el número de enclaves microgranulares existentes por orientación estudiada, así como el porcentaje de ellos que presenta desplazados que no afectan diferencialmente a esta estructura y el porcentaje de los que presenta un desplazado que no afecta al encajante. Como se puede observar en la tabla, esta morfología de deterioro que afecta solo a los enclaves se sitúa únicamente en las fachadas con orientación Sur

**Tabla 9.1:** Porcentaje de enclaves deteriorados en función de su tipo de deterioro y orientación

Orientación fachadas	Número enclaves	Sin deterioro diferencial (%)	Con deterioro diferencial (%)
Norte	11	9,1	0
Sur	29	27,6	24,1
Este	43	11,6	0

Con respecto al color de los enclaves en comparación con el encajante, la tabla 9.2 recoge los valores obtenidos en cada una de las zonas (media de 10 medidas) para los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  (CIE, 1986), así como el índice de blanco (WI) y el índice de amarillo (YI) (ASTM, 2000). Como era de esperar al ser una roca heterogénea constituida por minerales de diferente coloración, la dispersión en los datos es grande y la diferencia cromática entre encajante y enclaves es menor que lo que la percepción visual podría indicarnos. Tomando como valor de comparación general el parámetro  $\Delta E^*$  (CIE, 1986) definido como:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

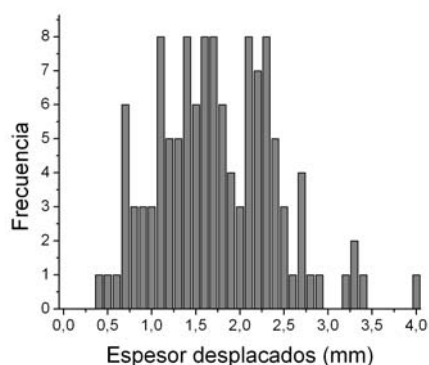
obtenemos un valor de 8,4 de diferencia media de color entre enclaves y encajante.

**Tabla 9.2:** Color de los enclaves y encajante

	Color enclaves					Color encajantes				
	L	a*	b*	WI	YI	L	a*	b*	WI	YI
E1	55 ± 3	0,6 ± 0,1	4,5 ± 0,6	13 ± 2	11 ± 1	63 ± 4	0,6 ± 0,4	6,1 ± 0,9	14 ± 2	13 ± 2
E2	61 ± 1	0,5 ± 0,1	3,8 ± 0,3	20 ± 1	8 ± 1	69 ± 2	0,9 ± 0,3	6,9 ± 0,5	18 ± 1	14 ± 1
E3	61 ± 2	0,3 ± 0,1	4,7 ± 0,6	18 ± 2	10 ± 1	66 ± 2	0,9 ± 0,2	7,3 ± 0,6	15 ± 2	15 ± 1
E4	61 ± 2	0,4 ± 0,1	4,1 ± 0,6	19 ± 1	9 ± 1	67 ± 2	0,6 ± 0,1	6,0 ± 0,4	19 ± 1	12 ± 1
E5	55 ± 2	1,1 ± 0,2	4,3 ± 0,4	13 ± 1	10 ± 1	65 ± 3	1,0 ± 0,2	7,1 ± 0,9	14 ± 3	15 ± 2
E6	59 ± 1	0,5 ± 0,1	3,9 ± 0,4	18 ± 1	9 ± 1	69 ± 3	1,2 ± 0,4	7,9 ± 0,8	15 ± 3	16 ± 1
E7	57 ± 1	0,6 ± 0,1	5,3 ± 0,6	13 ± 1	12 ± 1	66 ± 2	0,9 ± 0,3	7,6 ± 0,7	13 ± 2	15 ± 1
E8	53 ± 2	0,6 ± 0,1	3,5 ± 0,5	14 ± 2	8 ± 1	62 ± 3	0,6 ± 0,2	5,2 ± 0,5	17 ± 3	11 ± 1
med.	58	0,6	4,3	16	10	66	0,9	6,8	16	14
d.e	4	0,3	0,7	3	2	4	0,3	1,1	3	2

La luminosidad ( $L^*$ ) y el índice de blanco (WI) son los parámetros en los que deberíamos esperar más variación, dado que la escala de ambos parámetros considera como valor 0 el negro puro y como valor 100 el blanco puro, lo que, como se discutió en anteriores capítulos, podríamos equiparar al albedo de las superficies. Si tomamos de forma más específica cada uno de estos parámetros observamos que las mayores diferencias se dan en los valores de luminosidad ( $L^*$ ), reflejando este menor albedo de

las superficies de los enclaves con respecto al encajante. Los valores del índice de blanco no reflejan esta diferencia, sin embargo, la heterogeneidad de este material, y el hecho de que tanto enclave como encajante están constituidos de granos de alto albedo (feldespatos, cuarzo) y bajo albedo (biotitas, anfíboles), justifica la similitud en este índice.



**Figura 9.11:** Histograma de distribución de las medidas tomadas tanto en enclaves como en encajante.

En lo referente al tamaño de los enclaves estudiados y su grado de deterioro, la tabla 9.3 recoge el área superficial de cada uno de ellos y el área de la superficie que se ha perdido por desplazado. Todos los enclaves que presentan deterioros diferenciales con respecto al encajante están orientados hacia el Sur y el grado de material perdido oscila entre el 31,5 % del área total que presenta el enclave E1 hasta el 81,5 % del enclave E6.

La medida de los espesores de los desplazados se realizó en una muestra conjunta que incluía tanto a los desplazados que afectaban solo a los enclaves, como a desplazados que no afectaban de manera diferencial a enclaves y encajantes. El análisis

**Tabla 9.3:** Área, orientación y cantidad de material perdido de los enclaves estudiados

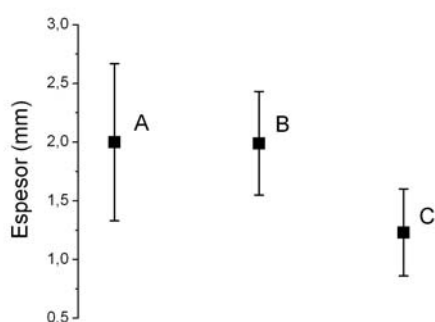
Orientación enclave	Área (cm <sup>2</sup> )	Área desplacado (cm <sup>2</sup> )
E1 S	58,1 ± 0,8	18,3 ± 1,1
E2 S	12,1 ± 0,0	-
E3 E	24,5 ± 0,6	-
E4 E	55,0 ± 1,0	-
E5 S	48,5 ± 0,2	18,0 ± 1,0
E6 S	21,4 ± 0,6	17,5 ± 0,3
E7 E	155,0 ± 4,0	-
E8 N	228,0 ± 7,0	-

conjunto de todas estas medidas está recogido en el histograma de la figura 9.11. Este histograma presenta una distribución polimodal de las medidas de espesor donde, a una aparente suma de distribuciones normales centradas en 1,6, 2,2 y 3,3 mm, se superponen una serie de picos, en los que se observa una separación bastante constante de aproximadamente 0,3 – 0,4 mm.

El carácter polimodal de la distribución hace pensar en diversas familias de desplazados, que pudieran corresponder también a procesos de formación diferentes. Si se analizan por separado los desplazados que afectan tanto a los enclaves como al



encajante de los desplazados que afectan solo a los enclaves se obtienen los datos recogidos en la figura 9.12 donde los valores de espesor de estas morfologías de deterioro para los desplazados causados principalmente por acción del agua y que afectan tanto a encajante como gabarro son: en el encajante  $2,00 \pm 0,67$  y en los gabarros  $1,99 \pm 0,44$ , mientras que en los desplazados que afectan solo a los enclaves este valor es  $1,23 \pm 0,37$ . El primer par de valores, prácticamente idéntico, confirma, como se ha observado visualmente, que no existe un control litológico en el origen de esta morfología.



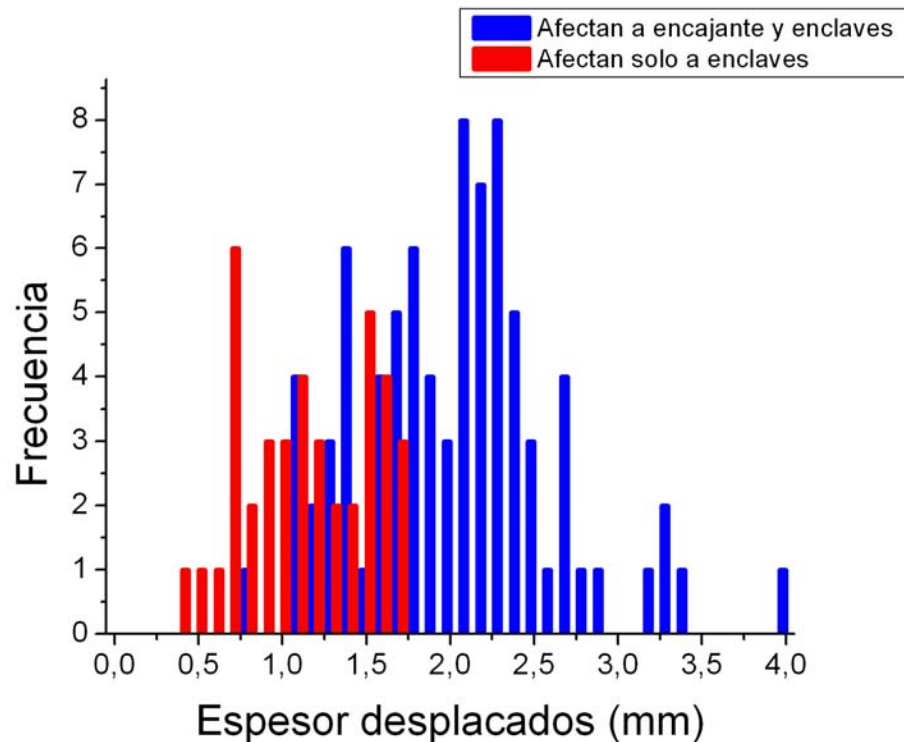
**Figura 9.12:** Espesor de los desplazados que: (A) afectan al encajante, (B) afectan a los enclaves y pueden afectar a su vez al encajante y que (C) afectan de manera diferencial a los enclaves.

Esto sugiere la existencia de al menos dos procesos diferenciados de generación de los desplazados presentes: por un lado los que darían lugar a las morfologías que afectan indiferenciadamente a ambos materiales y por otro lado aquellos que afectan únicamente a los enclaves microgranulares.

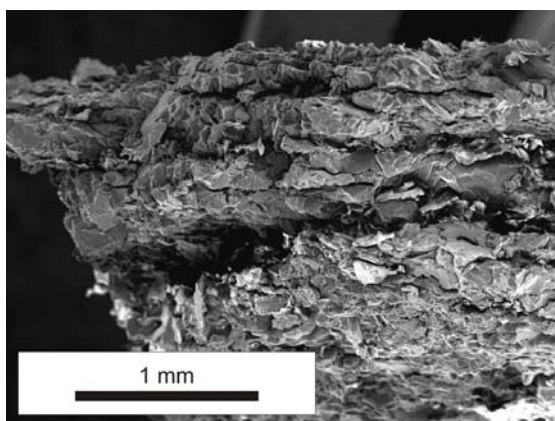
Siguiendo este razonamiento, cabría esperar que en la distribución general de espesores se reconocieran, al menos, dos poblaciones normales que reflejaran esta diferencia. La figura 9.13 recoge las medidas obtenidas de los desplazados separando en este caso aquellos que afectan indiferenciadamente a enclave y encajante de aquellos que solo afectan a los enclaves microgranulares. Se observa en este caso como la distribución de ambos tipos de desplazados sigue dos distribuciones diferenciadas, manteniéndose en ambos casos una polimodalidad con picos a una frecuencia aproximadamente constante dentro de una distribución normal general.

Las observaciones de microscopía electrónica de barrido en modo de electrones secundarios (SEM-SE) de los desplazados en perfil confirma la relación que estos picos superpuestos a las distribuciones normales generales tienen con la estructura del material (figura 9.14). El tamaño medio de los granos minerales de los enclaves es del orden de  $0,3 - 0,4$  mm, de tal manera que los planos a favor de los cuales el material se descama o desplaca van a situarse siguiendo una sucesión de valores múltiplos de esta

cantidad. Esto explica que la frecuencia de valores para estos espesores destaque sobre el fondo de la distribución normal obtenida a partir de todas las medidas.



**Figura 9.13:** Histograma de distribución de las medidas de espesores de desplazados separando las poblaciones de desplazados que afectan solo a los enclaves de las que afectan a enclaves y encajante.

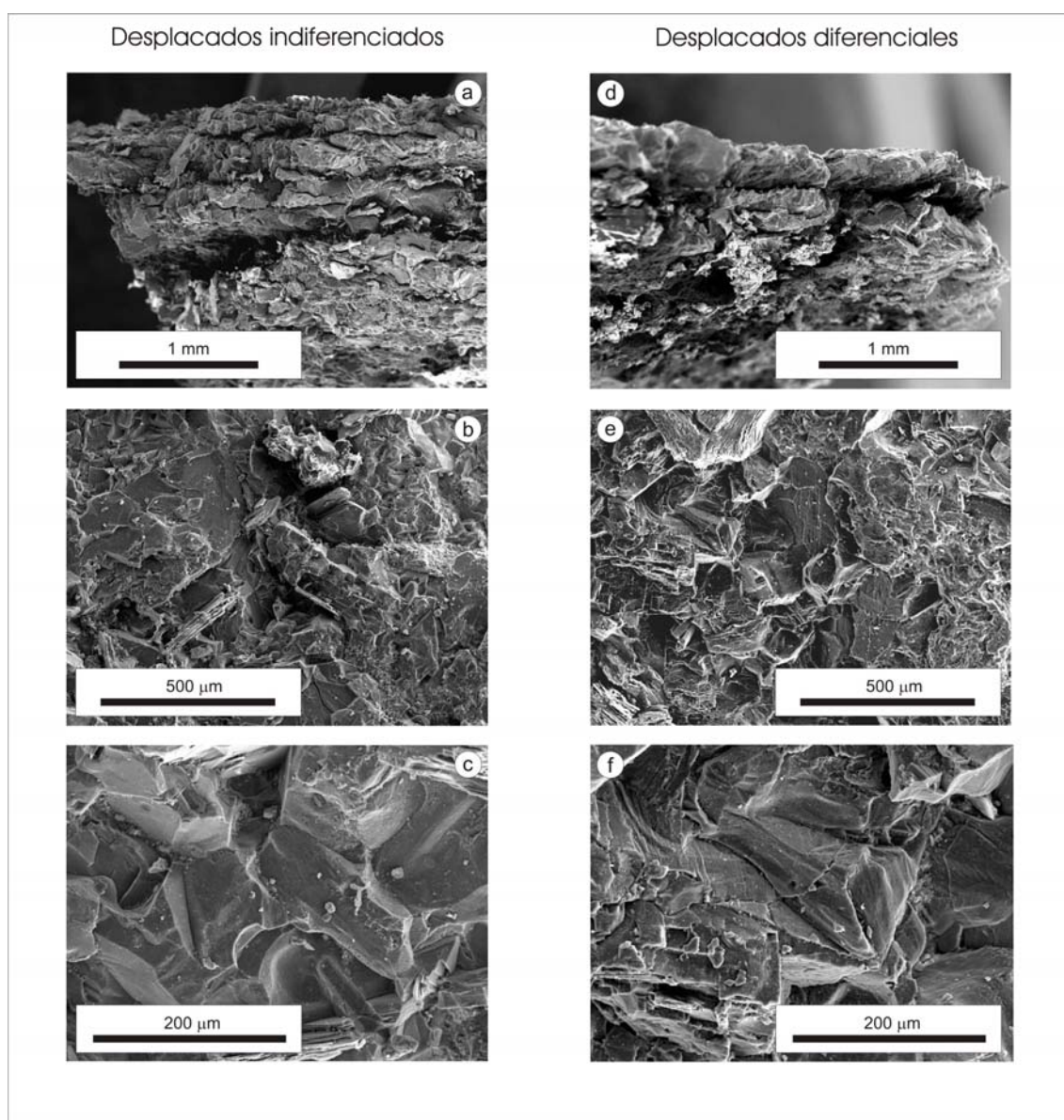


**Figura 9.14:** Imagen SEM-SE del perfil de un desplazado en el que se observa como los diferentes planos de separación coinciden con los espesores de los cristales.

Las imágenes SEM-SE de la figura 9.15 muestran las características microscópicas y principales diferencias entre los dos tipos de morfologías encontradas: aquellas que afectan de manera no diferencial a encajante y enclaves (*desplacados indiferenciados*) y las que afectan de manera exclusiva a los enclaves (*desplacados diferenciales*). Los *desplacados indiferenciados* se caracterizan por que los planos de

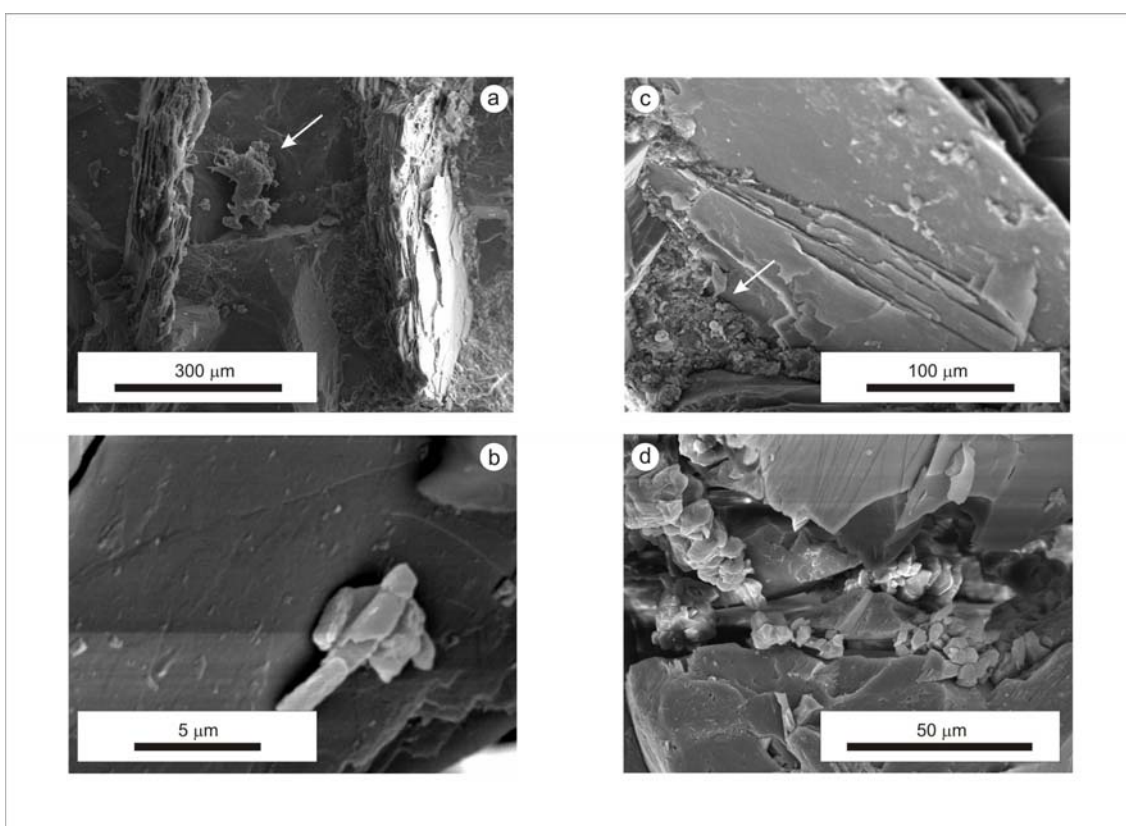
separación principal afectan a varias “filas” de granos (a), mientras que en los

*desplacados diferenciales*, se observa que los planos principales de despegue afectan apenas a la primera línea de granos (d). Los *desplacados indiferenciados* muestran una cantidad importante de material intersticial en las fracturas (b). Esto parece indicar que el agua ha tenido un papel importante en la producción del deterioro en este tipo de desplazados. Con respecto al tipo de fracturación de los granos en cada caso, en los *desplacados diferenciales* se observa una mayor proporción de fracturas intragranulares (f) que en los *desplacados indiferenciados* (c) que suelen presentar fracturación intergranular o en algunos casos transgranular.



**Figura 9.15:** Aspecto general al SEM-SE de los desplazados que afectan indistintamente a enclaves y encajante (*desplacados indiferenciados*) y de aquellos que solo afectan a los enclaves (*desplacados diferenciales*) en lo que se refiere a: espesor de los desplazados (a,d), material intersticial (b,e) y modo de fractura de los granos (c,f).

Analizando de manera más detallada estas características, los rellenos intersticiales de los *desplacados indiferenciados* están formados por sales y materia orgánica principalmente (Figura 9.16). Las sales presentes son fundamentalmente cloruros y sulfatos que aparecen entremezcladas con partículas de contaminación y residuos orgánicos inidentificables, aunque en algunos casos se distingue la presencia de bacterias y hongos. Esto indica de forma bastante clara la presencia habitual y abundante de agua en el sistema poroso, lo que ha de tenerse en cuenta a la hora de evaluar que tipo de proceso ha podido causar estos desplazados. Esta serie de rellenos no aparece en los desplazados de tipo *diferencial*.

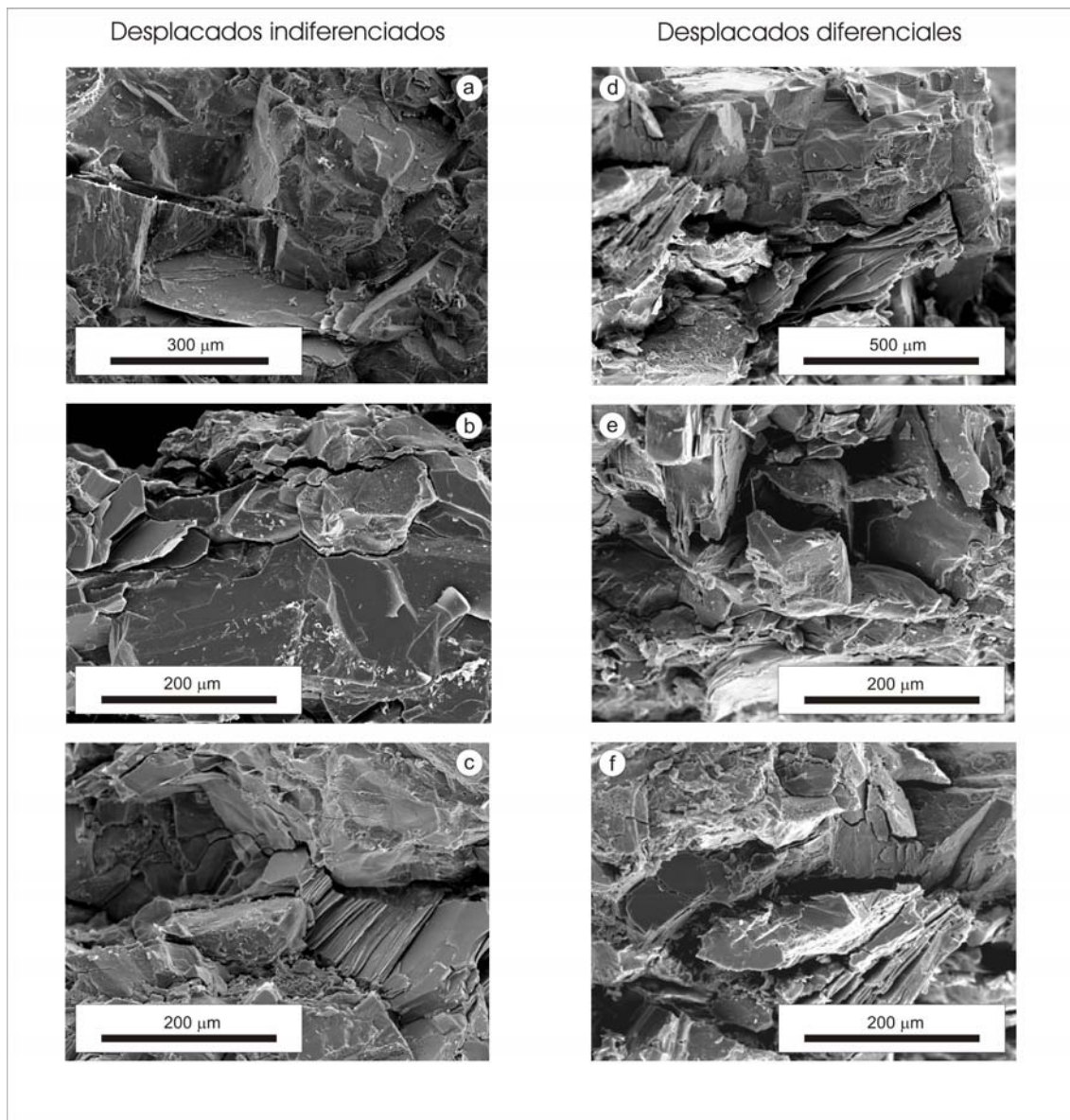


**Figura 9.16:** Imágenes SEM-SE de *desplacados indiferenciados* en las que se observa la existencia de microorganismos (a, b), así como la presencia de sales entremezcladas con materia orgánica y otros residuos en los poros del material (c, d).

Con respecto al tipo de fisuración que presentan los desplazados de cada uno de los dos tipos (Figura 9.17), se puede destacar como en el caso de los *desplacados indiferenciados* la presencia de fisuras intracristalinas es muy escasa en comparación con las intercristalinas (9.17b) y cuando se observa una fracturación intercristalina, forma realmente un sistema transcristalino del tipo *fisuras de Griffith* en el cual las fracturas intracristalinas están generadas siguiendo un criterio de mínima energía a



partir de una apertura intercrystalina previa, formando fracturas inter e intracrystalinas un ángulo muy bajo entre ellas, como se aprecia en la figura 9.17a y c. En el caso de la figura 9.17a la fisura surge a partir de una acumulación de sales que la nuclea y a partir de ahí crece de manera transgranular. En la figura 9.17c el núcleo de las fisuras intracrystalinas es la separación de las hojas de un cristal de mica. La presión producida por este proceso genera una fractura intracrystalina que se ve nucleada a partir de una unión intercrystalina.



**Figura 9.17:** Imágenes SEM-SE de los tipos principales de fisuración en *desplacados indiferenciados* y *diferenciales*.

En el caso de los *desplacados diferenciales*, se observa que la proporción de fisuración intercrystalina es notablemente mayor (figura 9.17c por ejemplo), y aunque

existen fisuras transcristalinas similares a las del caso anterior, se pueden observar muchas relaciones de fisuras inter e intracristalinas de hasta  $90^\circ$  (figura 9.17f) que no permiten explicar la fisura intracristalina como una mera continuación “energéticamente favorable” de las fisuras intercristalinas, sino que hay que buscar alguna causa que cause la deformación desde el grano mineral.

### **9.1.2. Evolución térmica diaria de enclaves y encajante.**

La evolución de las temperaturas para cada uno de los enclaves seleccionados en el estudio y su encajante circundante en los cuatro días de mediciones están recogidas en la figura 9.18 (situada al final de este apartado para una presentación más sintética de los resultados). En líneas generales, la primera distinción que se observa en las evoluciones de las temperaturas es la consecuencia de los dos regímenes de temperaturas simultáneos a los que se ven sujetas las superficies, por un lado el calentamiento convectivo debido a la temperatura del aire que rodea a los sillares, más el régimen de calentamiento por radiación cuando los sillares reciben insolación directa. Las superficies sujetas sólo a convección, como serían las correspondientes al enclave E8, que solo recibe insolación directa durante un breve periodo de tiempo en las medidas de verano, presentan un comportamiento que se aproxima a una curva senoide. Cuando las condiciones atmosféricas son propicias y la intensidad de la radiación incidente es alta las superficies sujetas a radiación siguen una pauta coincidente con lo observado en la evolución de las temperaturas en el modelo de laboratorio en el cual la radiación produce un calentamiento de tipo logarítmico que tiende a un valor asintótico que viene definido principalmente por la cantidad de energía incidente (y el albedo de las superficies, en tanto en cuanto este determina la cantidad de energía absorbida por el material) y la conductividad térmica del material que condiciona el flujo térmico de las capas externas a las capas internas de la roca. El cese de la radiación determina un descenso de temperatura de tipo exponencial condicionado por la ley de enfriamiento de Newton. Esta pauta se ve modificada cuando las condiciones atmosféricas condicionan un nivel de radiación menor o el ángulo de los rayos solares con la superficie de medida es relativamente bajo, condicionando la

variación progresiva a lo largo del tiempo de la radiación incidente una morfología de las curvas híbrida de los dos casos anteriores.

Con respecto a las condiciones meteorológicas de los días de las mediciones referentes a viento, nubosidad, niveles de contaminación y fronda de los árboles, las medidas tomadas en el equinoccio de primavera se realizaron en un día claro con viento frío racheado del Norte y nubes ocasionales. Las condiciones durante las medidas del solsticio de verano fueron de nubosidad de media a alta de cirros y estrato-cirros, junto con una “opacidad” atmosférica general debida a niveles altos de contaminación. La jornada de mediciones del equinoccio de otoño coincidió con un día claro con ausencia total de nubosidad y bajos niveles de contaminación atmosférica. Durante el solsticio de invierno, la nubosidad era escasa, con pequeños nimbos ocasionales y brisa de media a fuerte en rachas muy espaciadas. En las medidas en el solsticio de invierno cabe destacar también que los árboles no tenían fronda, mientras que en el resto de mediciones si la tenían.

Como era de esperar, la temperatura alcanzada por los enclaves máficos con menor albedo supera la temperatura alcanzada por el encajante circundante con un valor medio que incluyendo todos los enclaves y todas las estaciones es de 0,4 °C y un valor máximo de 5 °C (en invierno en el enclave E1).

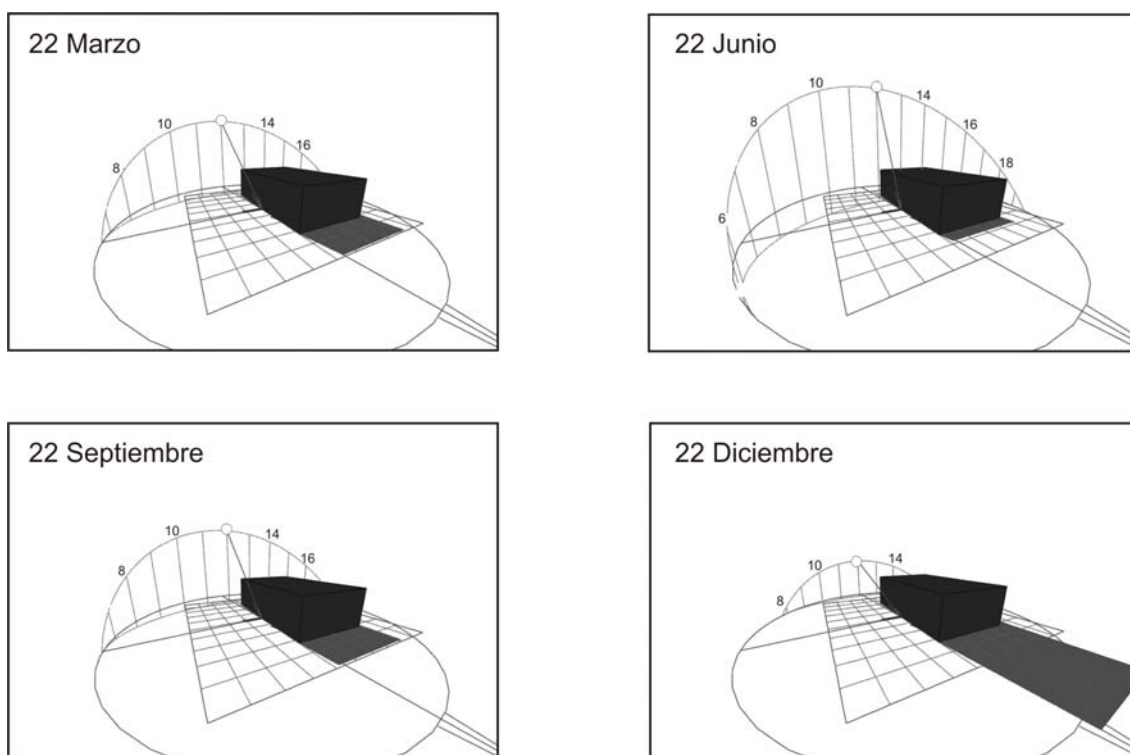
El análisis de las curvas tomadas en relación a la orientación de las fachadas donde están situados los enclaves, muestra como existe una ciclicidad de rango anual que se recoge en la tabla 9.4 que varía con respecto a las fachadas.

**Tabla 9.4:** Máximos de temperatura superficial (°C) registrada en los enclaves en cada uno de los días de medida.

	Sur		Este		Sur		Este	Norte
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Primavera	33,2	29,1	26,1	27,8	20,7	29,6	26,9	13,0
Verano	32,6	31,1	36,7	32,0	27,9	33,2	38,6	28,4
Otoño	43,8	39,8	35,7	37,4	31,6	42,4	35,7	24,8
Invierno	25,9	21,1	11,3	11,6	22,3	25,9	9,8	9,0

Las fachadas Este (E3, E4 y E7) y Norte (E8) muestran un ciclo anual donde el máximo se sitúa en verano y el mínimo en invierno (excepto para el enclave E4, dado que sus medidas en verano están fuertemente afectadas por la fronda de los árboles), mientras que en las fachadas orientadas hacia el Sur (E1, E2, E5 y E6) el máximo se

sitúa en otoño y el mínimo en invierno. Si esto se relaciona con la trayectoria solar con respecto al horizonte y al edificio, que se recoge de manera esquemática en la figura 9.19 obtenida mediante el software *Suntool 1.10*, se observa que para una orientación Sur, el ángulo de incidencia de los rayos solares es menor en verano, dado que la posición relativa del sol con respecto al horizonte es más alta. Si esto se traduce a la irradiancia media recibida en cada una de las superficies, como recoge la tabla 9.5, el mínimo de intensidad de radiación recibida se sitúa en verano debido al menor ángulo de incidencia. Así aunque la temperatura ambiente sea mayor en verano que en otoño, la inclinación de los rayos solares, y por tanto la irradiancia sobre las superficies contrarresta este hecho. Esto favorece la consideración de que la evolución de temperaturas superficiales no ha de corresponder necesariamente a la evolución de la temperatura ambiental si se considera que el calentamiento de las superficies se da por radiación y no por convección. A esto se suma que los valores de contaminación atmosférica y nubosidad fueron mayores en la toma de medidas sobre el solsticio de verano.



**Figura 9.19:** Diagramas de la posición del sol con respecto al edificio al mediodía solar, así como la sombra proyectada y la trayectoria solar a lo largo de los días de las mediciones. Las horas del arco corresponden a tiempo solar



A estas variaciones de rango anual se suma la ciclicidad diaria que se expresa en al menos un ciclo de calentamiento y enfriamiento de las superficies. Sin embargo, este ciclo muestra una duplicidad en algunos casos debido fundamentalmente a la existencia de edificios circundantes. Concretamente, el edificio del instituto de ciencias ambientales, situado a unos 50 m de la fachada sur provoca una sombra que produce que en las medidas de invierno de los puntos E1 y E2 exista un calentamiento inicial de las superficies durante aproximadamente media hora seguido de un periodo de enfriamiento de aproximadamente 2 horas en el cual la temperatura se estabiliza a valores cercanos a los iniciales, para luego continuar con el ciclo principal de insolación.

**Tabla 9.5:** Valores horarios de irradiancia media ( $\text{W/m}^2$ ) para superficies verticales con distintas orientaciones para  $40^\circ$  N de latitud (Neila González, 2000).

<b>Marzo</b>	<b>5:00</b>	<b>6:00</b>	<b>7:00</b>	<b>8:00</b>	<b>9:00</b>	<b>10:00</b>	<b>11:00</b>	<b>12:00</b>	<b>13:00</b>	<b>14:00</b>	<b>15:00</b>	<b>16:00</b>	<b>17:00</b>	<b>18:00</b>	<b>19:00</b>
NORTE	0	0	21	33	38	40	41	41	41	40	38	33	21	0	0
SUR	0	0	104	261	414	539	619	647	619	539	414	261	104	0	0
ESTE	0	0	411	582	578	460	268	41	41	40	38	33	21	0	0
<b>Junio</b>	<b>5:00</b>	<b>6:00</b>	<b>7:00</b>	<b>8:00</b>	<b>9:00</b>	<b>10:00</b>	<b>11:00</b>	<b>12:00</b>	<b>13:00</b>	<b>14:00</b>	<b>15:00</b>	<b>16:00</b>	<b>17:00</b>	<b>18:00</b>	<b>19:00</b>
NORTE	92	180	137	44	40	40	40	40	40	40	40	44	137	180	92
SUR	11	27	35	38	138	228	288	309	288	228	138	38	35	27	11
ESTE	169	492	639	668	599	455	261	40	40	40	40	38	35	27	11
<b>Septiembre</b>	<b>5:00</b>	<b>6:00</b>	<b>7:00</b>	<b>8:00</b>	<b>9:00</b>	<b>10:00</b>	<b>11:00</b>	<b>12:00</b>	<b>13:00</b>	<b>14:00</b>	<b>15:00</b>	<b>16:00</b>	<b>17:00</b>	<b>18:00</b>	<b>19:00</b>
NORTE	0	5	25	34	38	40	41	41	41	40	38	34	25	5	0
SUR	0	5	91	231	373	489	565	591	565	489	373	231	91	5	0
ESTE	0	19	488	618	595	466	270	41	41	40	38	34	25	5	0
<b>Diciembre</b>	<b>5:00</b>	<b>6:00</b>	<b>7:00</b>	<b>8:00</b>	<b>9:00</b>	<b>10:00</b>	<b>11:00</b>	<b>12:00</b>	<b>13:00</b>	<b>14:00</b>	<b>15:00</b>	<b>16:00</b>	<b>17:00</b>	<b>18:00</b>	<b>19:00</b>
NORTE	0	0	0	15	28	34	36	37	36	34	28	15	0	0	0
SUR	0	0	0	174	406	565	662	695	662	565	406	174	0	0	0
ESTE	0	0	0	226	369	333	207	37	36	34	28	15	0	0	0

Se observan sobreimpuestos a los ciclos diarios una serie de ciclos de corto rango. Estos son de carácter aleatorio y admiten pocas generalizaciones en los casos en que se deben a la nubosidad o al viento. Sin embargo, existe una serie de ciclos de corto rango que se deben a factores estables en la constitución del entorno del edificio, como son los producidos por la existencia de árboles con fronda en las cercanías de algunas fachadas. Así algunos de los enclaves situados en la zona sur del edificio, como se observa en la figura 9.20, que comprende los enclaves del E1 al E6 sufren en mayor o menor medida la influencia de la sombra proyectada por ramas y follaje. Este es el caso de los enclaves

E1, E2 y E5 principalmente. Aunque el enclave E7 sufre también de manera ocasional el ensombrecimiento debido a la vegetación, esto sucede durante las medidas de verano durante un breve lapso de tiempo en los primeros momentos de insolación.

Así por ejemplo, las gráficas correspondientes a los enclaves E1, E2 y E5 muestran un número mucho mayor de episodios de subidas y bajadas de temperatura correspondientes a la sombra proyectada por ramas y follaje. Hay que tener en cuenta, que al deberse estos ciclos a elementos “fijos” del entorno del edificio, se van a repetir de forma diaria independientemente de las condiciones meteorológicas, lo que tiene una consecuencia bastante clara si se considera que introducen un factor multiplicador de los episodios de dilatación y, por tanto, tensión térmica que puedan sufrir estos materiales.



**Figura 9.20:** Vista general de la zona sur del edificio (enclaves E1 a E6) donde se observa la presencia de árboles que proyectan sombra en estas fachadas.

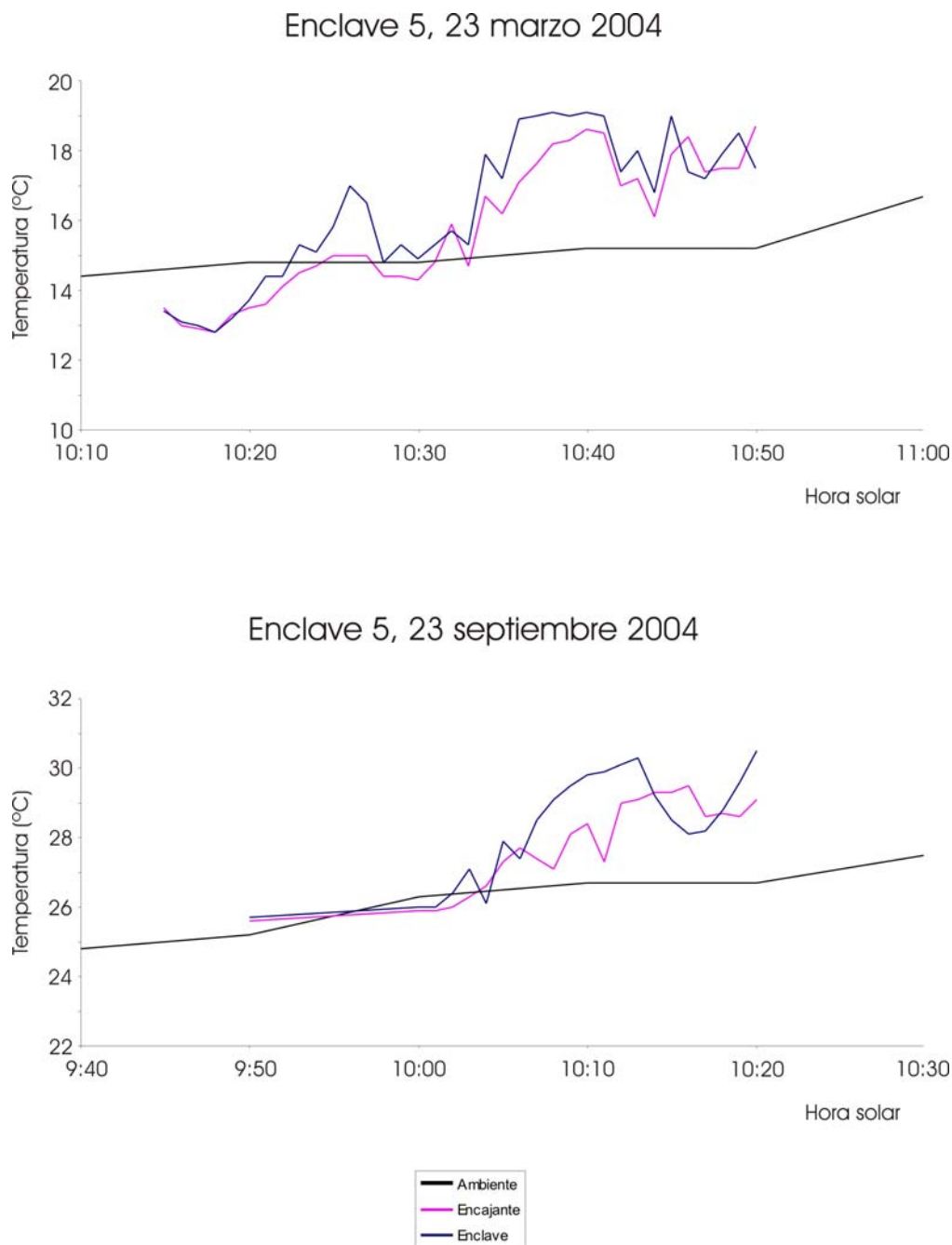
Estas sombras afectan en muchas ocasiones de manera parcial al encajante y al enclave de tal manera que, en ciertas ocasiones, invierten la tendencia normal en la relación de temperaturas de enclave y encajante quedando más frío el enclave que el encajante. La figura 9.21 muestra una secuencia de fotografías tomadas de manera consecutiva en el enclave E5, que es el punto donde más frecuentes son estos episodios cortos de sombras, para

ilustrar la complejidad de la evolución térmica de las superficies si se tiene en cuenta los ciclos de corto rango provocados por breves episodios de ensombrecimiento.



**Figura 9.21:** Secuencia de fotografía en el enclave E5 que muestra la complejidad de los regímenes de sombras en la superficie de los materiales

La figura 9.22 muestra dos series cortas de medidas efectuadas con intervalos de medida de 1 minuto en el encajante y enclave de E5. Se observa la cantidad de ciclos de calentamiento-enfriamiento de corto rango que se pueden producir sobreimpuestos a los ciclos de carácter diario. Esto es importante, en tanto en cuanto los mayores gradientes de temperatura, superiores a los  $2^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ , propuestos por Yatsu (1988) como suficientes para crear deformaciones permanentes en los granos, se dan, como se refirió en capítulos anteriores, en los primeros momentos de comienzo o cese de los episodios de insolación más que en un estado estacionario de calentamiento por radiación.



**Figura 9.22:** Ciclos de corto rango en dos series de medidas para el enclave E5

**Tabla 9.6:** Parámetros de los ciclos térmicos del Pabellón Central del CSIC; enclaves 1 a 4.

		E1		E2		E3		E4	
Orientación Tipo de desplacado		Sur		Sur		Este		Este	
		Diferencial		Indiferenciado		Indiferenciado		Indiferenciado	
		Encj.	Encl.	Encj.	Encl.	Encj.	Encl.	Encj.	Encl.
Primavera	Horas insolación/día	7,67		7,67		4,0		4,0	
	T. máxima	28,9	33,2	28,2	29,1	25,8	26,1	26,9	27,8
	T. mínima	12,0	11,6	11,7	12,0	11,2	11,3	12,0	12,0
	$\Delta T$ máxima y mínima	16,9	21,6	16,5	17,1	14,9	15,8	14,9	15,8
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	1,3		0,3		0,3		0,3	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	9	17	6	9	6	7	5	6
	Ciclos/horas insolación	1,30	1,56	1,30	1,69	1,50	1,50	1,25	1,50
Verano	Horas insolación/día	6,50		7,17		5,17		4,33	
	T. máxima	31,4	32,6	31,3	31,1	36,1	36,7	31,5	32
	T. mínima	23,0	22,9	23,0	23,0	22,6	22,6	22,2	22,2
	$\Delta T$ máxima y mínima	8,4	9,7	8,3	8,1	13,5	14,1	9,3	9,8
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	0,40		0,20		0,3		0,2	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	3	3	1	3	4	5	2	2
	Ciclos/horas insolación	1,69	1,69	1,26	0,98	1,35	1,35	1,38	1,38
Otoño	Horas insolación/día	6,83		5,67		4,00		4,00	
	T. máxima	39,6	43,8	39,6	39,8	34,5	35,7	37,1	37,4
	T. mínima	22,2	22,1	22,3	22,1	21,4	21,2	22	21,7
	$\Delta T$ máxima y mínima	17,4	21,7	17,3	17,7	13,1	14,50	15,10	15,70
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	1,3		0,3		0,4		0,3	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	3	11	1	3	3	5	2	3
	Ciclos/horas insolación	1,02	0,88	0,88	0,88	1,00	0,75	0,25	0,25
Invierno	Horas insolación/día	4,50		4,67		1,67		0,33	
	T. máxima	22,3	25,9	20,4	21,1	11,4	11,3	11,7	11,6
	T. mínima	8,0	8,5	7,0	6,8	6,4	6,7	7,5	7,4
	$\Delta T$ máxima y mínima	14,3	17,4	13,4	14,3	5,00	4,60	4,2	4,2
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	1,1		0,4		0,2		0,2	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	9	15	5	9	3	3	0	0
	Ciclos/horas insolación	1,78	1,56	1,50	1,50	1,80	1,20	0,00	0,00
Valores medios	Horas insolación/día	6,38		6,29		3,71		3,17	
	$\Delta T$ máxima y mínima	14,2	17,6	13,9	14,3	11,5	12,6	10,9	11,4
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	1,0		0,3		0,3		0,2	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min cada día	6,00	11,50	3,25	6,00	4,00	5,00	2,25	2,75
	Ciclos/horas insolación	1,45	1,42	1,24	1,26	1,41	1,20	0,72	0,78

Con respecto a la humedad medida en las superficies, no se observan apenas diferencias en el grado de humedad entre los enclaves y sus encajantes. Los valores de humedad en los puntos seleccionados son muy bajos, encontrándose cerca del límite de detección del medidor de humedad (8,5), si no por debajo del mismo y no excediendo

en ningún caso un 15 %. Solo en las situaciones más bajas del zócalo del edificio, que presentan las morfologías de *desplacado indiferenciado* descritas anteriormente, el aporte de humedad es mayor. Esto parece apoyar la hipótesis de que la humedad debe jugar un papel secundario y supeditado a los cambios térmicos en la formación de los *desplacados diferenciales*.

**Tabla 9.7:** Parámetros de los ciclos térmicos del Pabellón Central del CSIC; enclaves 5 a 8

		E5		E6		E7		E8	
Orientación		Sur		Sur		Este		Norte	
Tipo de desplazado		Diferencial		Diferencial		Indiferenciado		Indiferenciado	
		Encj.	Encl.	Encj.	Encl.	Encj.	Encl.	Encj.	Encl.
Primavera	Horas insolación/día	4,00		3,17		5,33		0	
	T. máxima	19,1	20,7	28,7	29,6	25,9	26,9	13,2	13,0
	T. mínima	13,5	13,5	12,7	12,4	9,9	10,3	9,8	9,7
	$\Delta T$ máxima y mínima	5,6	7,2	16,0	17,2	16	16,6	3,4	3,3
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	0,2		0,3		0,5		0,1	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	3	4	6	6	6	4	0	0
	Ciclos/horas insolación	1,58	1,89	1,50	2,25	0,94	0,75	0,00	0,00
Verano	Horas insolación/día	4,17		5,33		6,83		1,67	
	T. máxima	27,9	27,9	32,5	33,2	38,2	38,6	28,8	28,4
	T. mínima	22,6	22,6	22,5	22,7	21,8	21,7	21,2	21,3
	$\Delta T$ máxima y mínima	5,3	5,3	10,0	10,5	16,4	16,9	7,6	7,1
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	0,1		0,1		0,4		0,5	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	1	1	1	1	3	4	2	1
	Ciclos/horas insolación	1,68	1,68	1,69	1,69	1,90	2,05	0,60	1,20
Otoño	Horas insolación/día	3,00		3,17		5,33		0,00	
	T. máxima	32,2	31,6	42,0	42,4	34,9	35,7	24,8	24,8
	T. mínima	22,5	22,4	22,2	22,1	19,1	19,5	19,2	18,9
	$\Delta T$ máxima y mínima	9,7	9,2	19,8	20,3	15,8	16,2	5,6	5,9
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	0,2		0,3		0,6		0,1	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	2	2	3	3	2	2	0	0
	Ciclos/horas insolación	1,33	2,00	0,32	0,63	1,31	0,75	0,00	0,00
Invierno	Horas insolación/día	2,00		2,83		1,00		0,00	
	T. máxima	19,9	22,3	25,5	25,9	9,8	9,8	9,1	9,0
	T. mínima	9,2	9,1	8,7	8,8	5,6	5,8	6,0	6,1
	$\Delta T$ máxima y mínima	10,7	13,2	16,8	17,1	4,2	4,0	3,1	2,9
	$\Delta T$ medio Encl. – Encj.	0,4		0,3		0,2		0,1	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	3	4	7	7	0	0	0	0
	Ciclos/horas insolación	1,00	1,50	1,06	1,06	2,00	2,00	0,00	0,00
Valores medios	Horas insolación/día	3,29		3,63		4,63		0,42	
	$\Delta T$ máxima y mínima	7,8	8,7	15,6	16,3	13,1	13,4	4,9	4,8
	$\Delta T$ Encl. – Encj.	0,2		0,2		0,4		0,1	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min. cada día	2,25	2,75	4,25	4,25	2,75	2,50	0,50	0,25
	Ciclos/horas insolación	1,38	1,86	1,16	1,32	1,54	1,39	0,15	0,30

Las tablas 9.6 y 9.7 resumen una serie de parámetros, a partir de las mediciones realizadas, para relacionar estas evoluciones de temperaturas con la existencia de morfologías de deterioro del tipo *desplacados diferenciales* en los enclaves estudiados. Entre los factores seleccionados se encuentra el tiempo de insolación total, considerándose este como el intervalo de tiempo desde que la superficie recibe los primeros rayos solares, hasta la última insolación. De tal manera, no se han tenido en cuenta los periodos de sombra de corto rango producidos por hojas o nubes, pero sí los periodos de sombra prolongados debidos principalmente a edificios.

Las tablas recogen a su vez las temperaturas superficiales máximas y mínimas superficiales para encajantes y enclaves, así como su incremento, y la media de las diferencias existentes entre las temperaturas de ambos sin tener en cuenta su signo. El incremento de temperaturas máximas y mínimas es indicativo del rango de deformación térmica que cada uno de los sectores del material va a sufrir ya que conviene recordar que la dilatación térmica es lineal directamente y proporcional a los incrementos de temperatura. La diferencia entre encajante y enclave da una idea de la presión confinante que el enclave (que al alcanzar mayores temperaturas, potencialmente se dilata más) va a sufrir por parte del enclave (que de la misma manera se dilatará proporcionalmente menos al alcanzar menores temperaturas).

Se han señalado específicamente el número de episodios con gradientes de temperatura mayores de  $2^{\circ}\text{C}/10\text{ min.}$  debido a la significancia que tiene el valor de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  como límite superior de fatiga establecido por Yatsu (1988). Debido a que el descenso de las temperaturas superficiales se produce de forma exponencial y el aumento de forma logarítmica, se ha considerado que el gradiente de  $2^{\circ}\text{C}$  entre dos intervalos de medida (10 minutos) se expresa más en un gradiente de esa magnitud durante el primer minuto, seguido de un equilibrio hasta la siguiente medida que en un gradiente constante de  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min.}$  Observando otra vez la figura 9.22, se comprueba que aumentando la densidad del muestreo los gradientes de subida o descenso de la temperatura operan en un rango que se aproxima más al minuto que a los 10 minutos. De tal forma este índice nos da una idea, para el intervalo de muestreo seleccionado, del número de veces que se supera el límite de fatiga para entrar en el campo de las deformaciones irreversibles; siempre teniendo en cuenta que si el intervalo de muestreo se reduce, este número aumentaría.

El número de ciclos por hora de insolación se ha obtenido contabilizando el número de episodios en que la temperatura asciende  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  o más, para luego descender durante el tiempo de insolación de la superficie, eliminándose las variaciones menores de  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  que podrían corresponderse con el error instrumental del aparato. Así, cada ciclo está constituido por una rampa de subida continua más una rampa de bajada de al menos  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada una. Este factor es significativo porque da una idea del número de ciclos reales de subida y bajada de temperatura, o lo que es lo mismo de dilatación y contracción, que se producen a lo largo del tiempo. Si se considera que una pequeña deformación puede dar lugar a una rotura a través de fenómenos de fatiga, es importante considerar que al hablar de deterioro por insolación, cada día no cuenta como un único episodio de deformación cristalina.

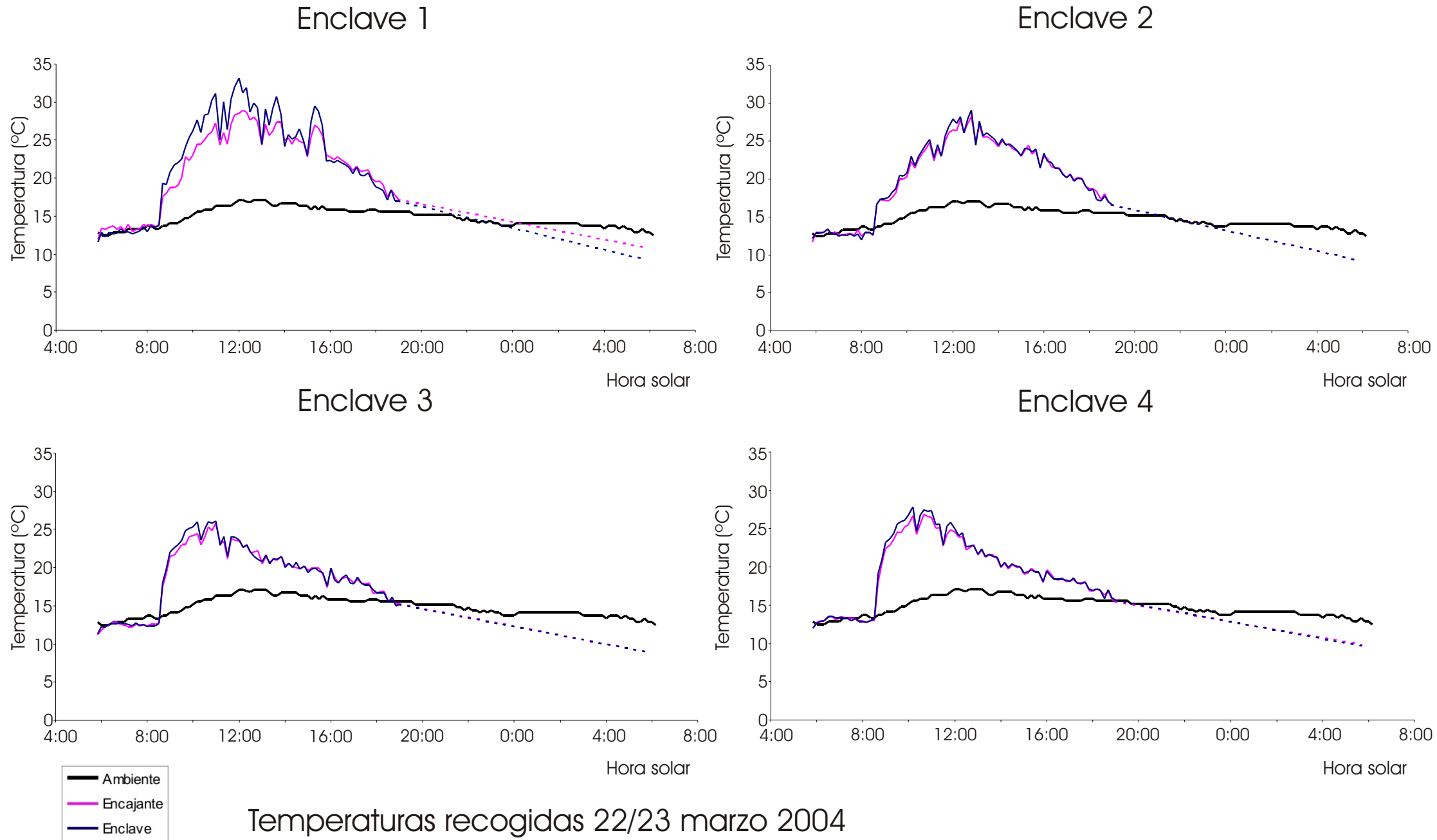
Relacionando los enclaves que presentan deterioro (E1, E5 y E6; para más detalles ver tabla 9.3) con estos parámetros, se observa que existe una relación directa entre la presencia de deterioro del tipo *desplacado diferencial* principalmente con el número de gradientes mayores de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y el número de ciclos por hora de insolación. Otro factor que tienen una relación directa, aunque en menor medida, es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima en cada enclave, mientras que los datos de diferencias medias entre enclave y encajante no muestran una relación tan clara con la existencia o no de deterioro de este tipo.

Analizando los datos por estaciones, se observa que, en general, primavera y otoño son las estaciones en las que los valores de todos los índices son más favorables a la existencia de un deterioro térmico. Con respecto a la orientación, los enclaves orientados hacia el Sur, muestran los valores más bajos en los índices en el solsticio de verano, lo que se relaciona con lo anteriormente comentado sobre la influencia que tiene la inclinación solar en la irradiancia. Sin embargo, en el número de ciclos por hora los valores son mayores en verano e invierno que en primavera y otoño. La orientación Norte favorece una homogeneidad en los regímenes térmicos, debido a que el calentamiento en estas áreas se debe a procesos de convección pura lo que, como se ha discutido anteriormente favorece una homogeneidad de la respuesta térmica de los materiales. Con respecto a la orientación Este, el comportamiento es muy disimilar debido fundamentalmente a la presencia del edificio del Archivo Nacional que modifica notablemente el comportamiento de los enclaves E3 y E4 con respecto al E7.

Los enclaves E5 y E1 son los que presentan valores más altos de ciclicidad horaria, lo que está favorecido por ser estos los que más sufren la acción de sombras de corta duración debidas a la vegetación. Con respecto a las diferencias existentes entre el enclave E1 y E2, situados en una posición similar, el enclave E2 tiene un tamaño mucho menor (área superficial de  $12,1 \text{ cm}^2$  frente a los  $58,1 \text{ cm}^2$  del enclave E1), lo que condiciona una menor masa térmica, que como se discutió anteriormente en el capítulo de diferencias térmicas entre granos minerales tiene su importancia en la generación de diferencias térmicas, y es apreciablemente cóncavo, lo que favorece una menor irradiancia en su superficie y por tanto menores valores en los índices. Comparando el enclave E5 y E6, el enclave E6 está más expuesto, mientras que el enclave E5 está condicionado por la presencia de abundante fronda afectándole. Esto condiciona que, especialmente en lo que se refiere a incrementos de temperatura sus índices sean muy bajos. Por el contrario, este enclave presenta los valores más altos de ciclicidad por hora de insolación.

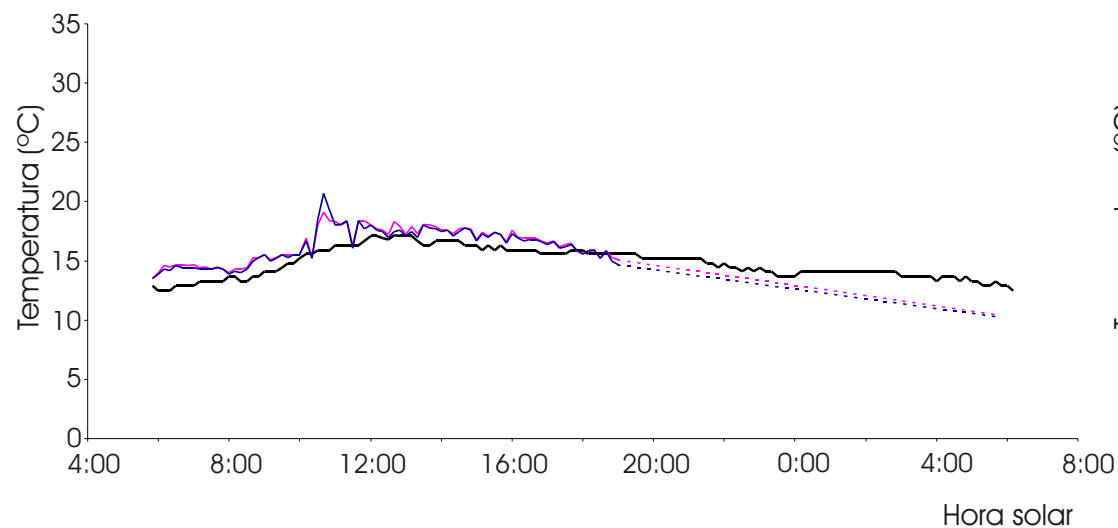


**Figura 9.18 a**

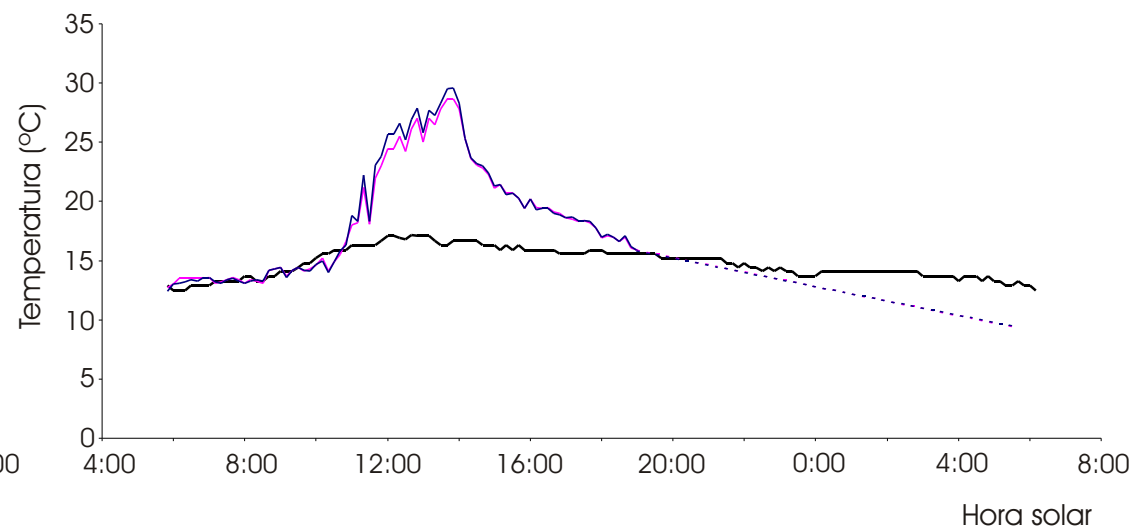


**Figura 9.18 b**

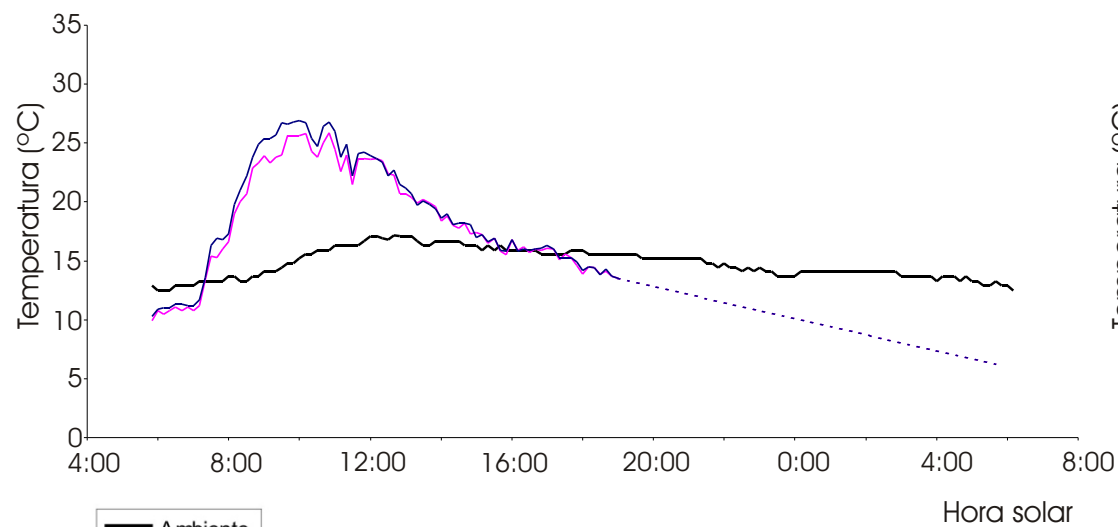
Enclave 5



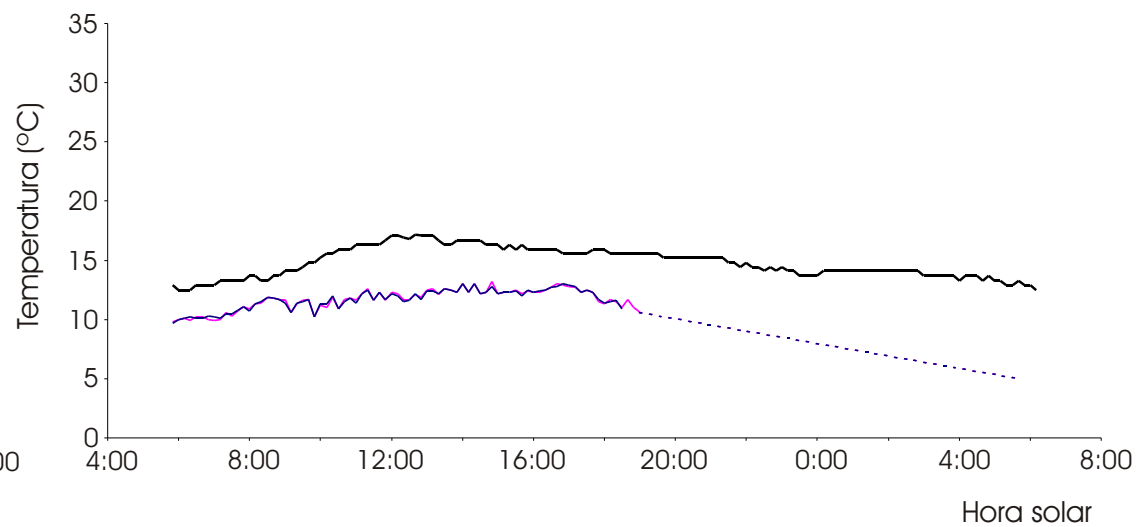
Enclave 6



Enclave 7

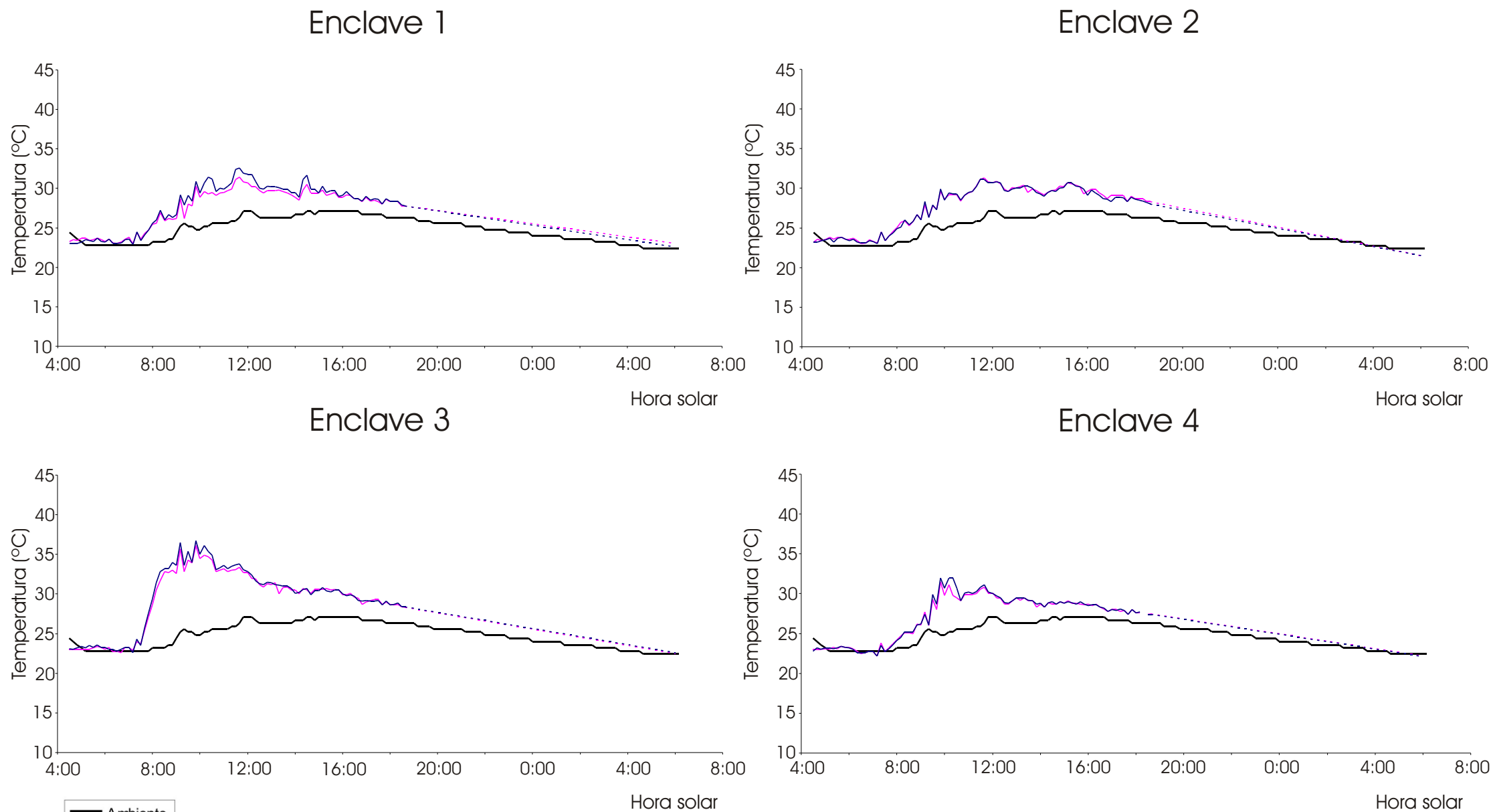


Enclave 8



Temperaturas recogidas 22/23 marzo 2004

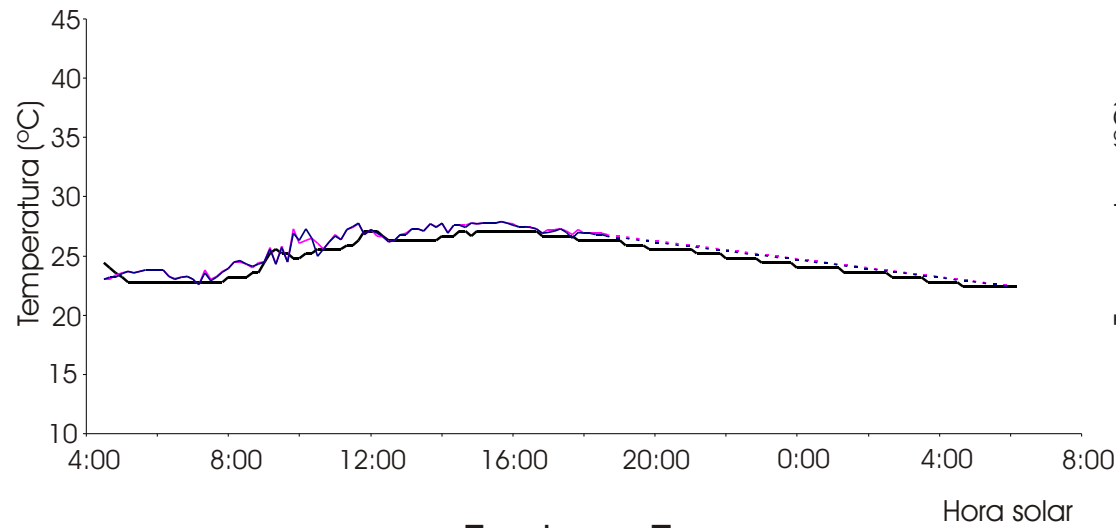
**Figura 9.18 c**



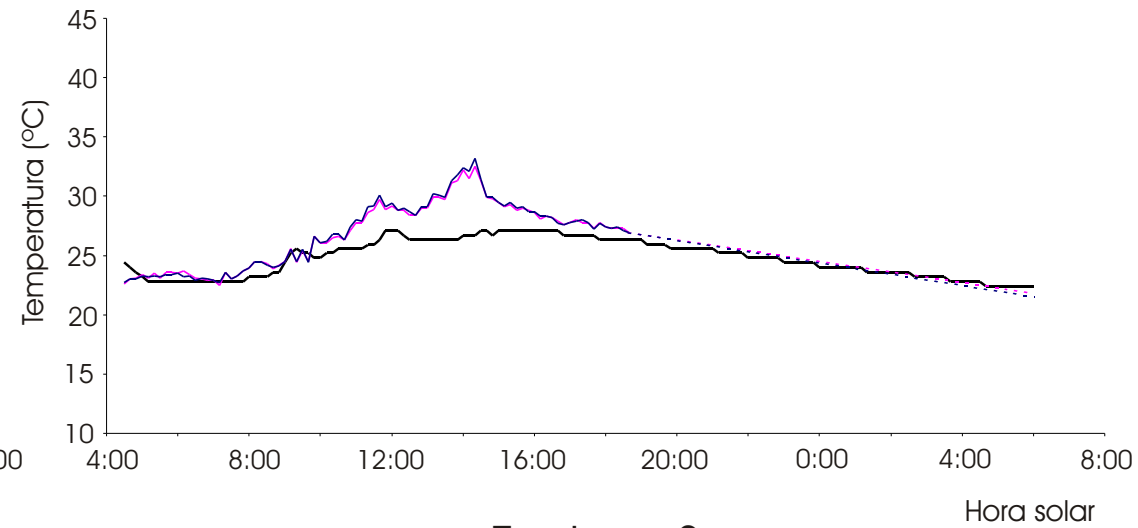
Temperaturas recogidas 22/23 junio 2004

## Figura 9.18 d

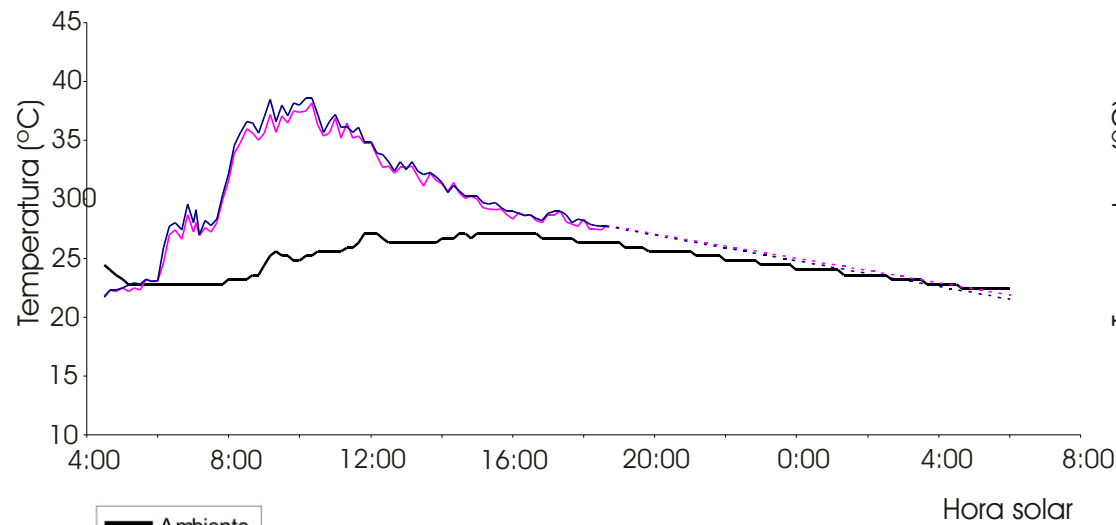
Enclave 5



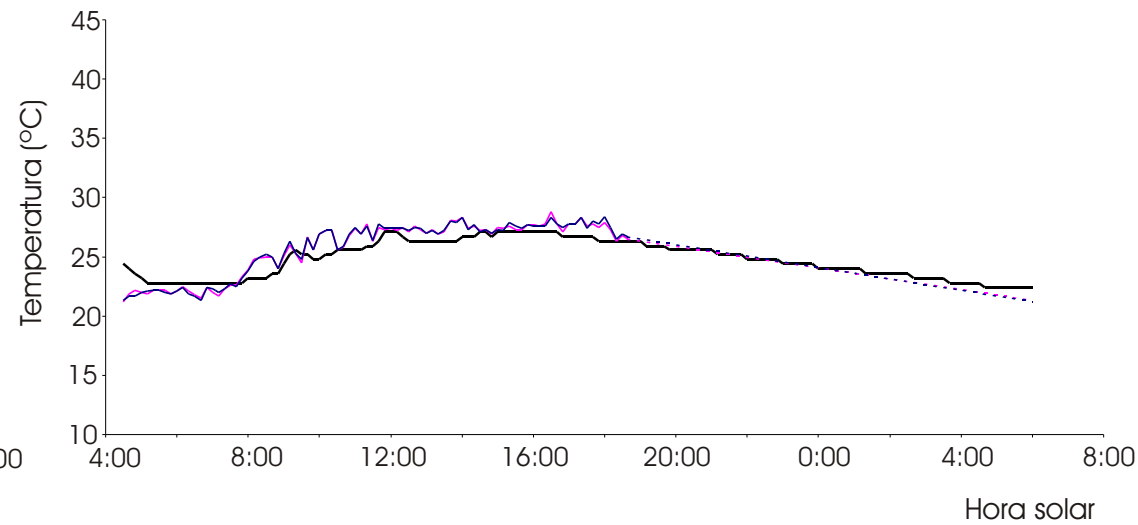
Enclave 6



Enclave 7

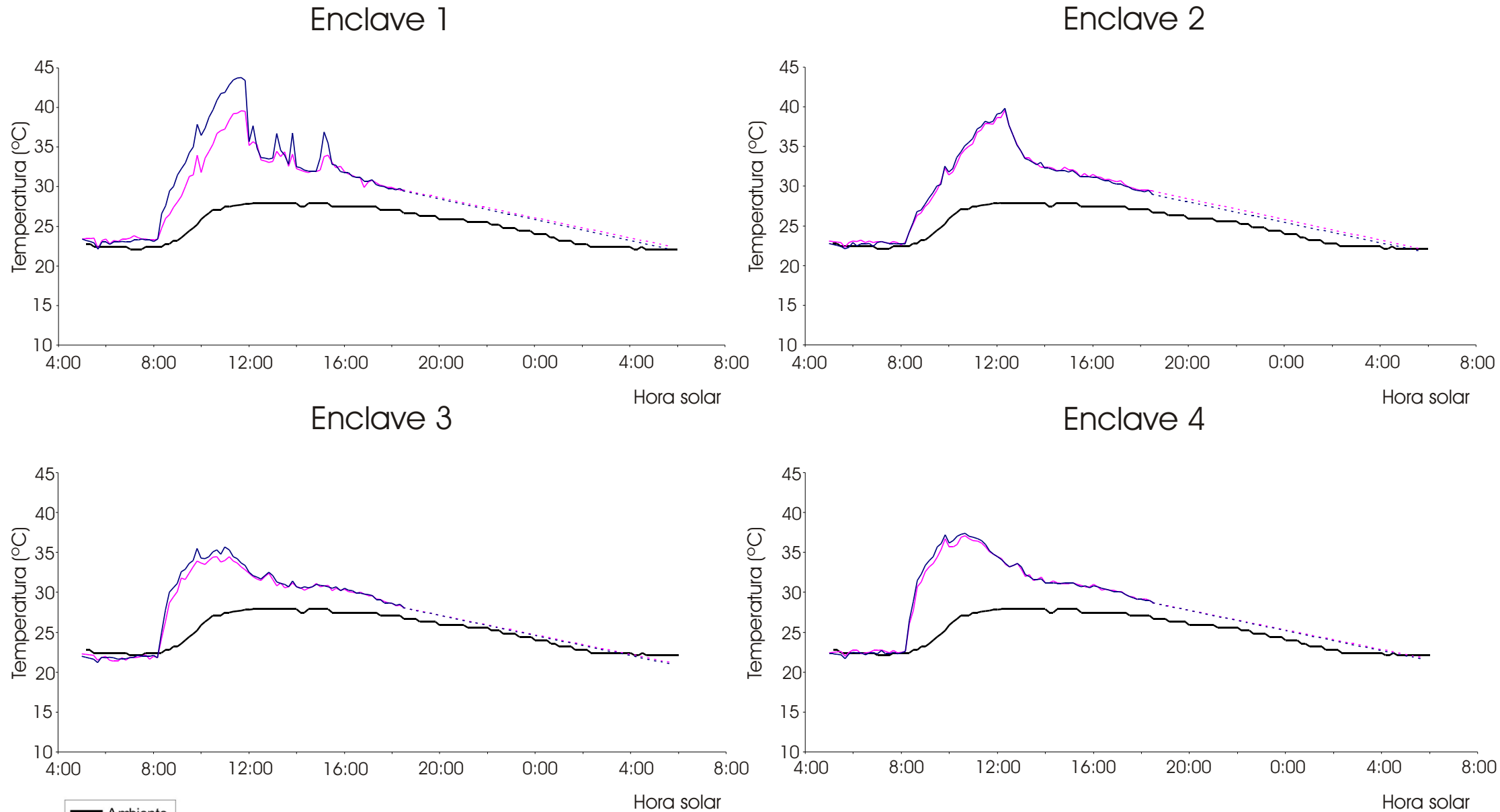


Enclave 8



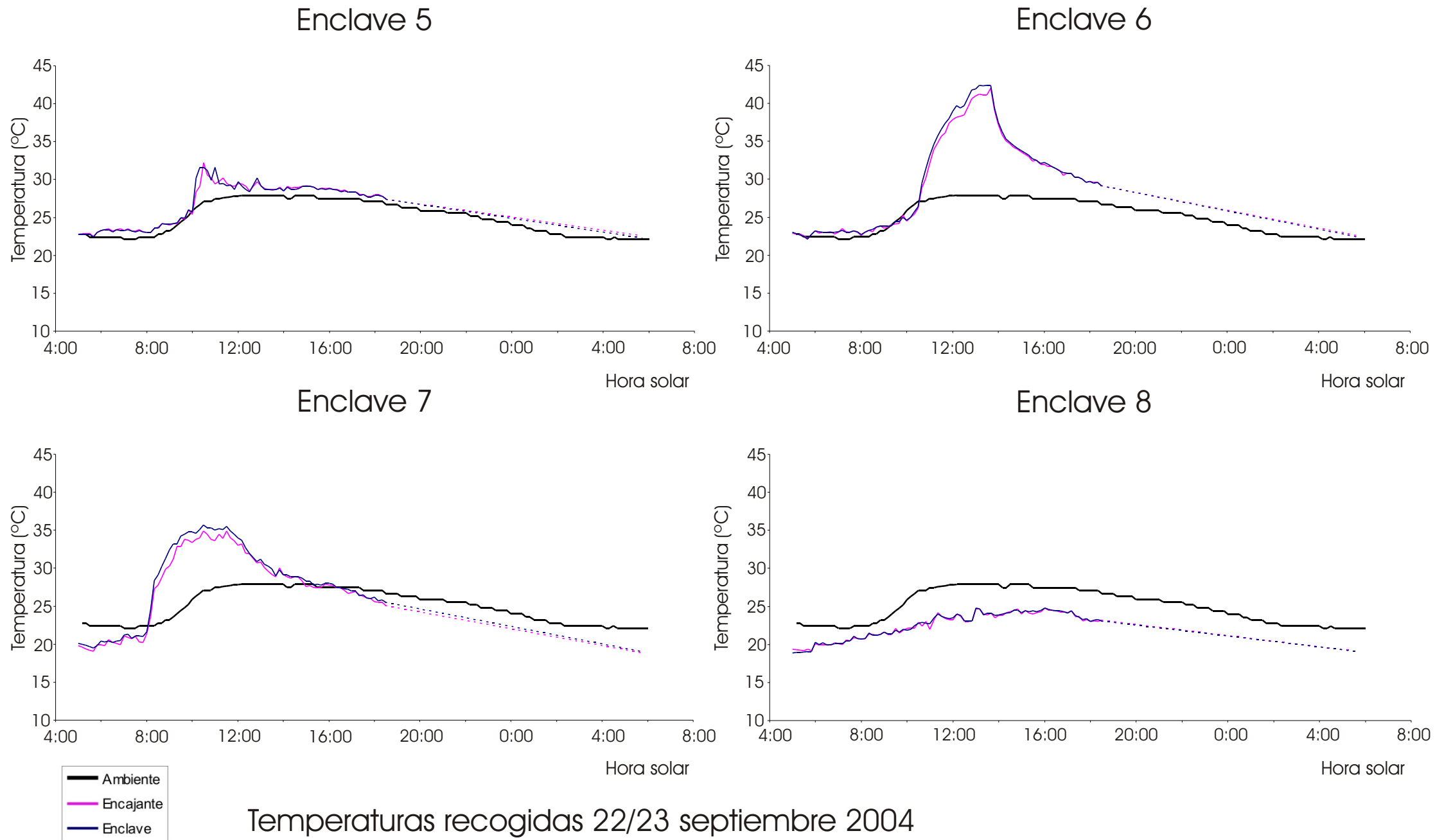
Temperaturas recogidas 22/23 junio 2004

**Figura 9.18 e**

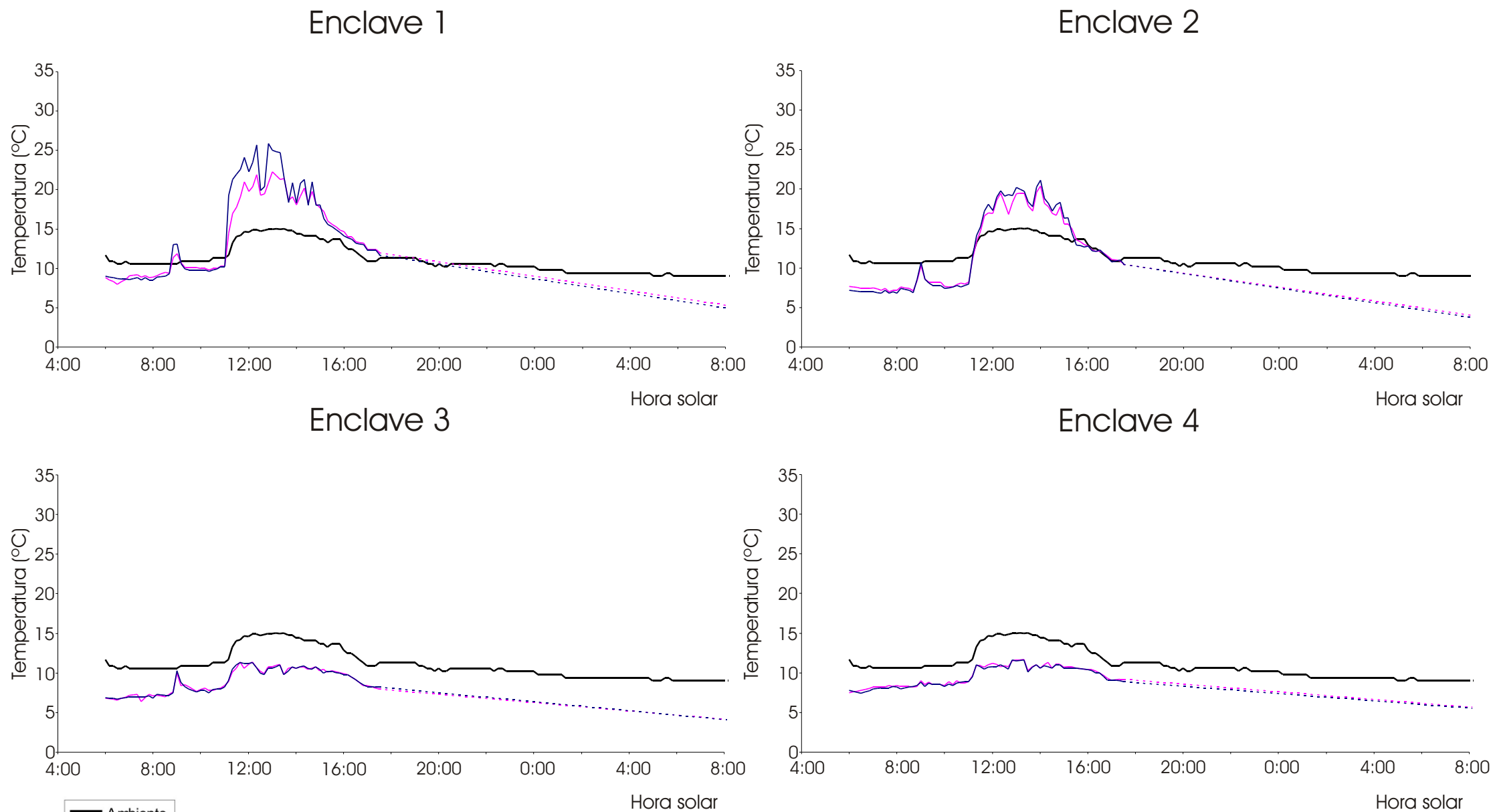


Temperaturas recogidas 22/23 septiembre 2004

**Figura 9.18 f**



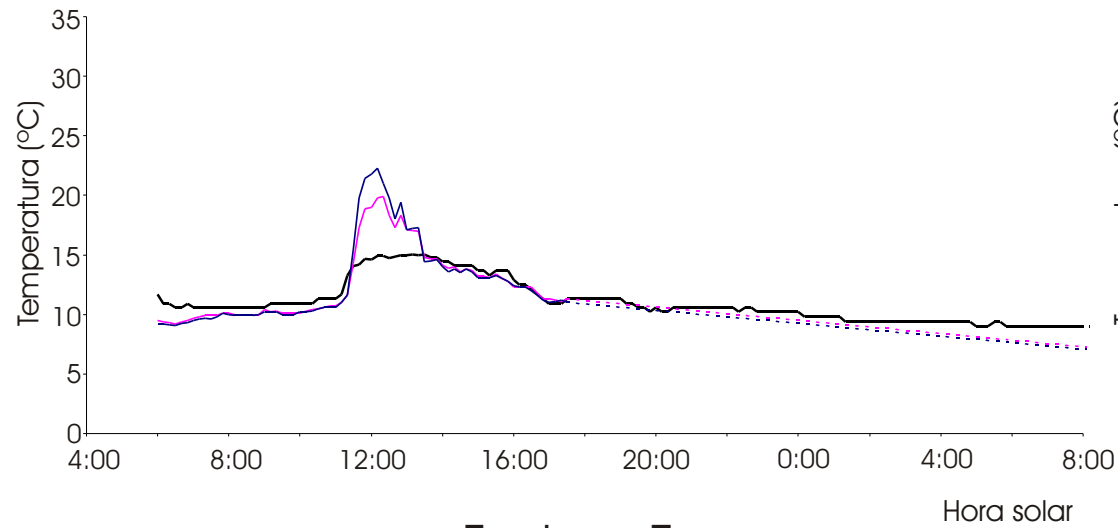
**Figura 9.18 g**



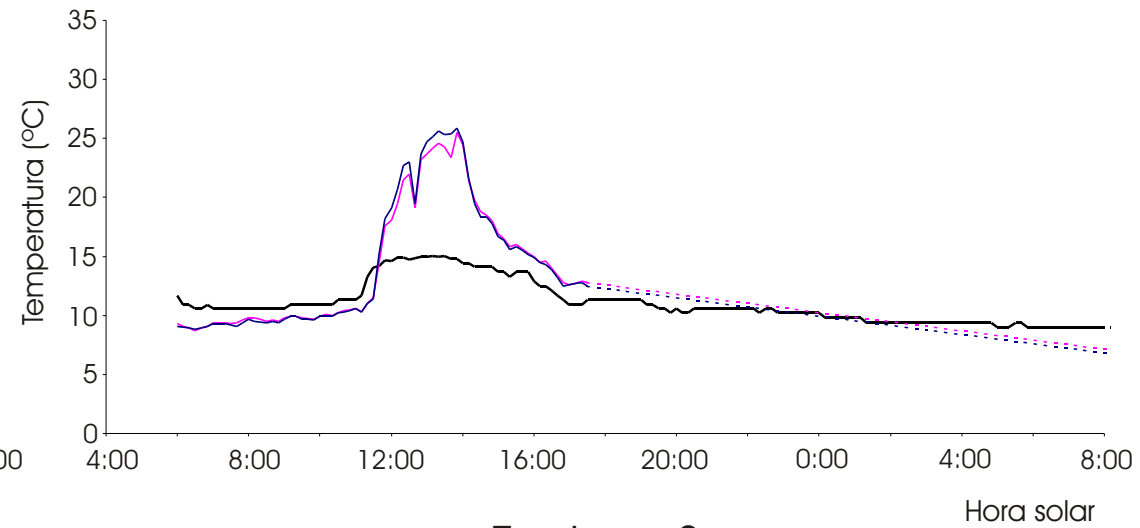
Temperaturas recogidas 22/23 diciembre 2003

**Figura 9.18 h**

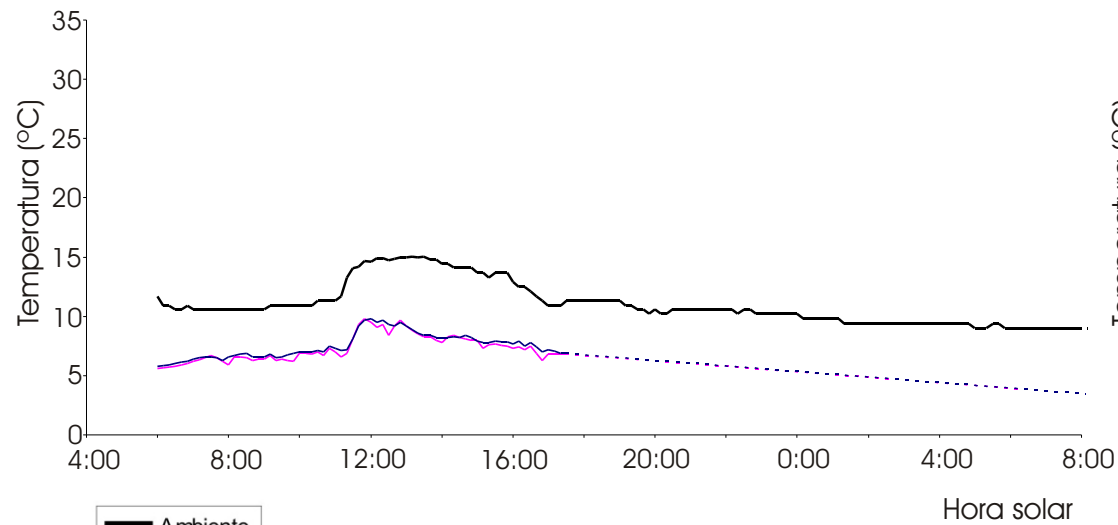
Enclave 5



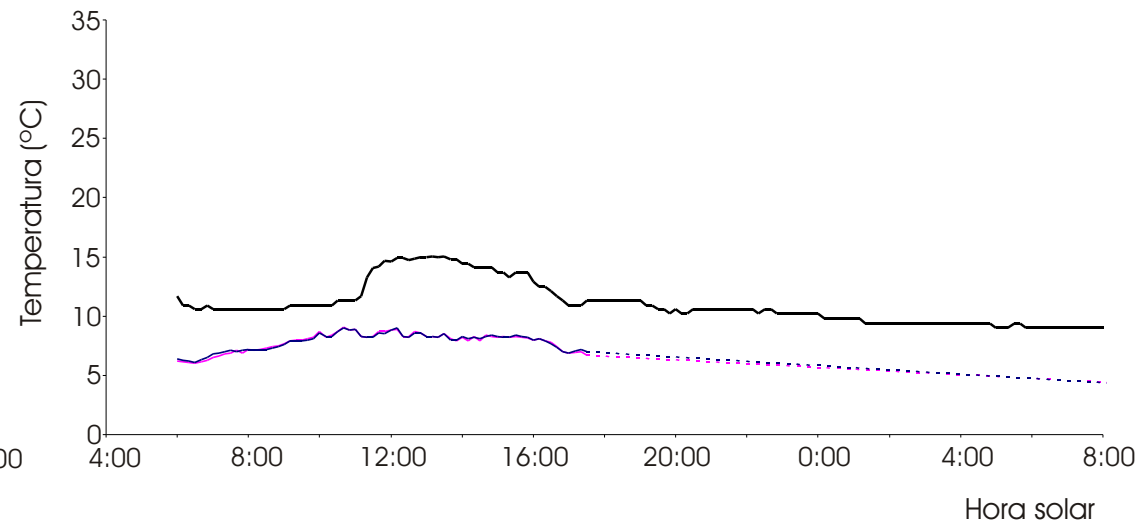
Enclave 6



Enclave 7



Enclave 8



Temperaturas recogidas 22/23 diciembre 2003

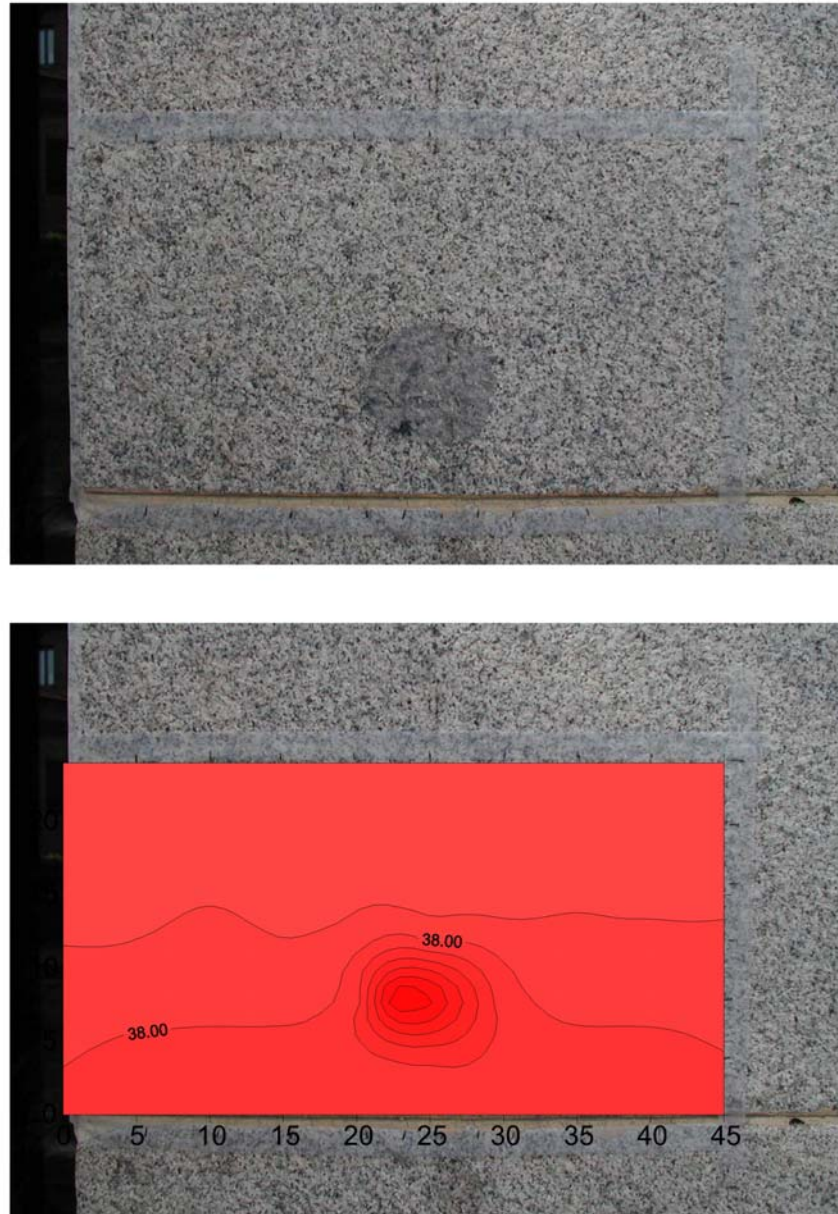


### 9.1.3. Distribución térmica espacial de enclaves y encajante.

Una vez obtenidos los resultados de la evolución temporal de enclaves y encajantes a partir de la medida puntual de temperaturas, este apartado estudia la evolución espacial de las temperaturas de un enclave y su encajante. Los datos recogidos a lo largo de 5 horas de insolación en un área del sillar donde el enclave E1 está situado se recogen en la figura 9.23 (al representar una serie larga de esquemas, está situada al final de este apartado). Se observa en esta serie de mapas de isotermas la distribución en planta así como en el perfil del sillar de las temperaturas, y su evolución con el tiempo desde el estado inicial de sombra con una temperatura relativamente homogénea para todo el sillar.

La insolación comienza en el sillar, a las 10:00 h, hora local del día 24 de agosto de 2004 (8:00 h. Hora solar), un día claro pero con unos niveles de contaminación altos, con los primeros rayos recibidos inciden casi paralelamente a la superficie y una temperatura ambiente inicial de 26,7 °C. En los diez primeros minutos de insolación se comienzan a percibir las primeras diferencias notables de temperatura entre el enclave y el encajante, apareciendo el enclave como un “punto caliente” en el entorno de un encajante con una temperatura homogénea. Esta situación de diferencias térmicas se va incrementando a medida que la insolación progresa en el sillar, siendo las diferencias de temperatura entre el enclave y el encajante mucho mayores que cualquier diferencia térmica recogida dentro del encajante. Se observa progresivamente que el encajante muestra también una gradación de temperaturas en perfil, que se mantiene a lo largo de todo el periodo, debido a la baja conductividad térmica del material, que se corresponde con lo observado en los ensayos de laboratorio de perfiles térmicos. Dentro del encajante, se observa también un gradiente de temperaturas entre la parte inferior del área de medida, que coincide con el borde inferior del sillar, y la parte superior que corresponde al centro del sillar. La causa de esto se encuentra por un lado en la transferencia de calor desde el enclave más caliente hacia el encajante circundante, más un efecto de “borde”, debido a que el mortero que une los sillares, actúa de aislante y dificulta la difusión de calor hacia el sillar inferior (ver figura 9.24).

Dentro del enclave se observan diferencias térmicas debidas también a la transferencia de calor del enclave al encajante, pero también debido al hecho de que no toda la superficie del enclave es homogénea.



**Figura 9.24:** Relación de la estructura del sillar y las heterogeneidades en el enclave con la distribución térmica: La separación entre sillares genera una barrera térmica que aumenta la temperatura en la parte basal del sillar. Las zonas con desplazados no desprendidos en el sillar se sobrecalientan

Así, las zonas donde el enclave esta desplazado, pero este desplazado no esta desprendido, sufren un sobrecalentamiento, debido a que existe una capa de aire que

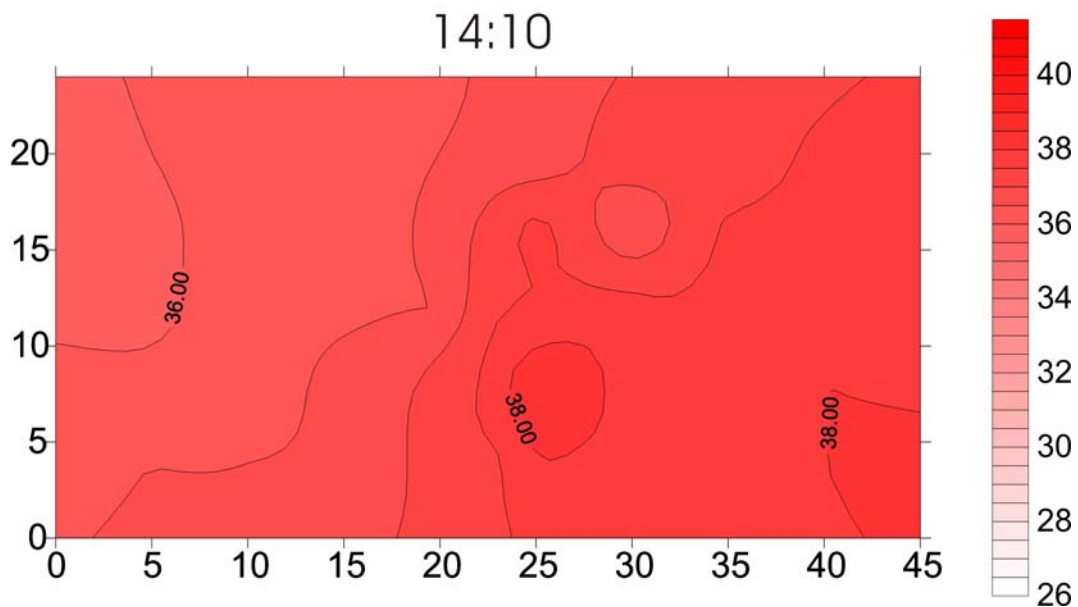
aísla el desplazado y el sustrato (ver figura 9.24). Esto sucede en el cuarto superior izquierdo del enclave. Por el contrario, las zonas donde el desplazado está desprendido o es inexistente, la temperatura es algo menor, pues existe una transferencia de calor más efectiva hacia las capas internas del material.

La secuencia de mapas de isotermas muestra la complejidad espacial que las corrientes de aire, o de manera más importante los episodios de sombra, generan en la superficie del sillar, reforzando lo que a partir de los datos de temperaturas en un punto se discutió anteriormente sobre la importancia de los ciclos de corto rango en la devolución de las temperaturas.

Como ejemplo de esto, la figura 9.25 muestra la expresión que tiene en las distribuciones de temperaturas superficiales el ensombrecimiento producido por el tronco y ramas del árbol que afecta a esta zona concreta del edificio. Si observamos los gráficos desde el momento recogido por esta figura (14:10 h. hora local; 12:10 h. hora solar) en adelante, se observa la relación que la morfología del ensombrecimiento tiene con la pauta de enfriamiento del material. Sin embargo la relación no es sencilla, dado que la sombra genera una serie de procesos de micro circulación de aire que se suma a la complejidad de la transferencia de calor en un régimen no estacionario que mezcla sombras e insolación.

Con respecto a los gradientes de temperatura alcanzados, la diferencia máxima entre la mínima y la máxima temperatura alcanzadas es de 15 °C para el enclave y de 12 °C para el encajante, mientras que el gradiente de la temperatura ambiental es de 6,9°C entre la temperatura final (33,6 °C) y la temperatura inicial (26,7 °C) del periodo de toma de medidas. El máximo gradiente horizontal en la superficie del sillar es de 4,5 °C mientras que en el perfil de distribución de temperaturas se alcanzan gradientes de hasta 5,5 °C. Sin embargo, este último dato hay que tomarlo con cautela, debido a que no es un perfil “real”, como el que se hubiera podido obtener a partir de sondas, pues está influenciado por los fenómenos de una superficie expuesta. Sin embargo da una idea de que el rango de variación de temperaturas en la superficie es de un orden de magnitud comparable a la variación que se obtiene en profundidad para un material calentado heterogéneamente de manera natural, lo que apoya la consideración expuesta en anteriores capítulos de la inadecuación de considerar más importantes los gradientes de temperatura en profundidad, que las variaciones que en superficie pueden alcanzar los

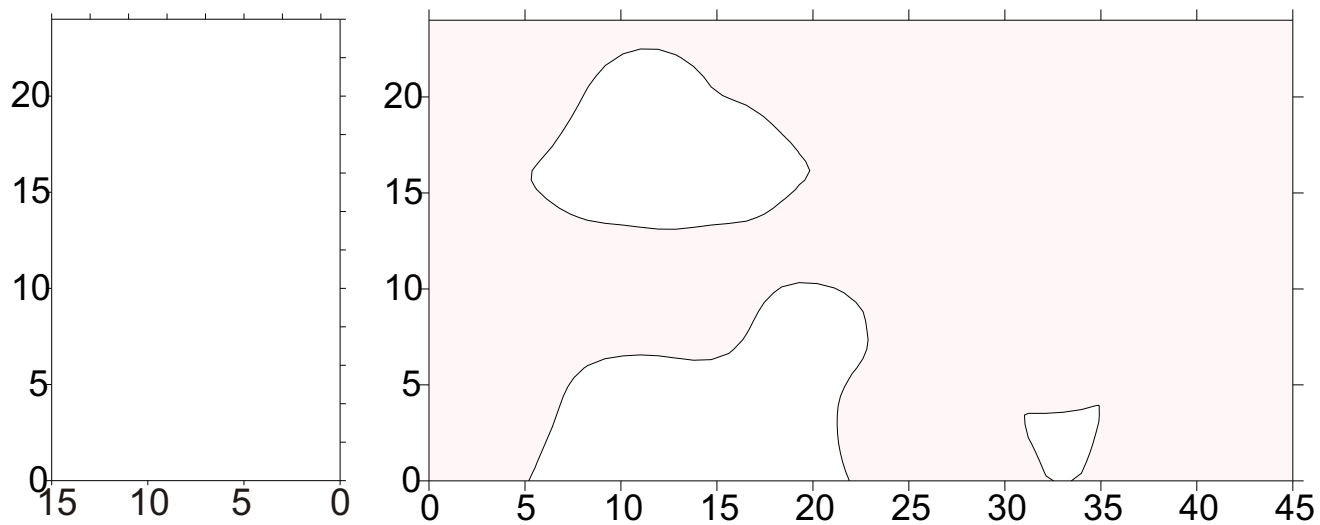
materiales, en este caso en una escala mayor que la expuesta anteriormente de cristales individuales. De tal manera, adquiere más validez la suposición de la importancia de los esfuerzos “horizontales”, como podría ser la presión confinante que el enclave sufre a causa de una mayor dilatación debida a un incremento mayor de temperaturas que su encajante, como añadido a los esfuerzos “verticales” debidos a la mayor temperatura de las zonas externas del material con respecto a las internas.



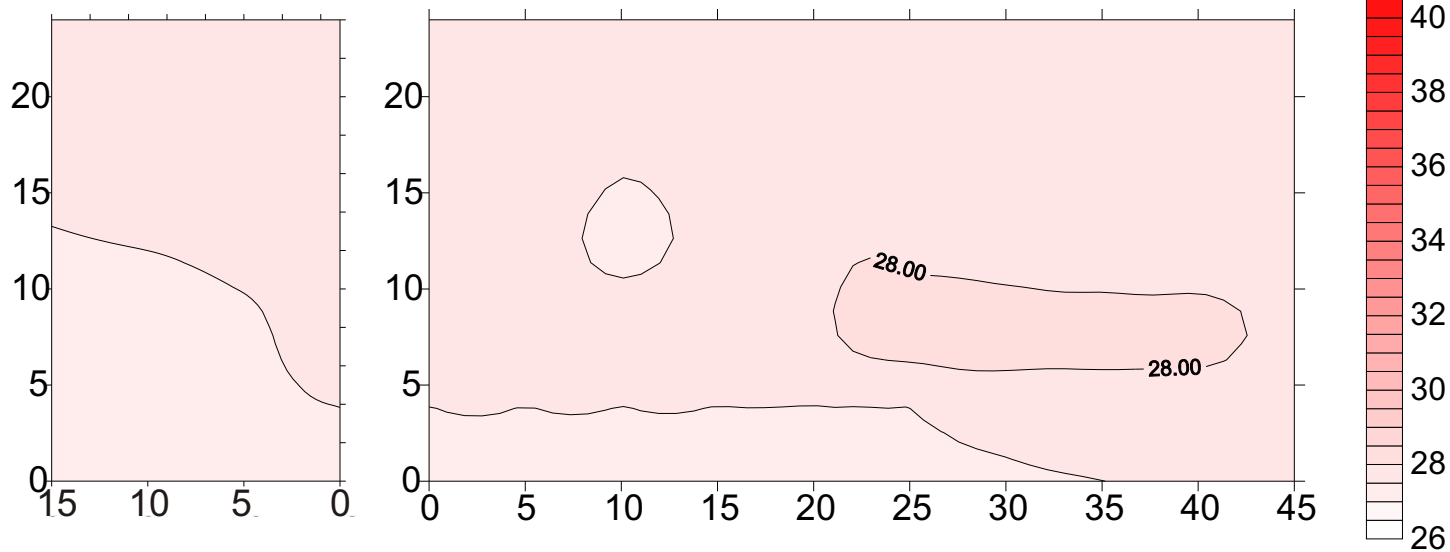
**Figura 9.25:** Relación de la sombra proyectada por la vegetación que rodea al edificio con la complejidad en la distribución de temperaturas superficiales en el área de medida.

# Figura 9.23 a

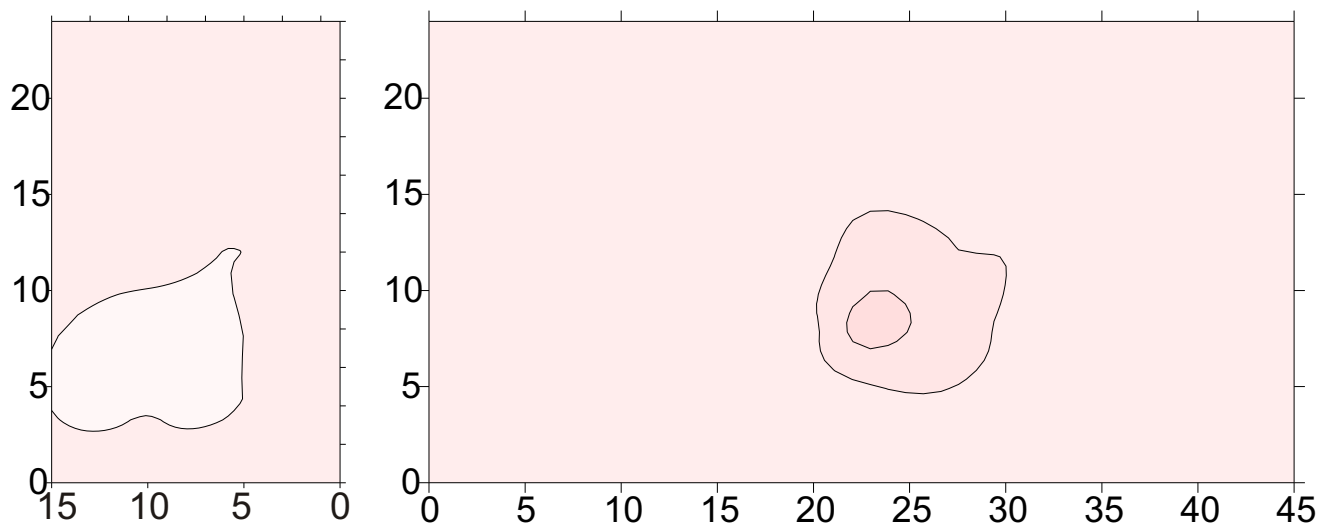
9:50



10:00

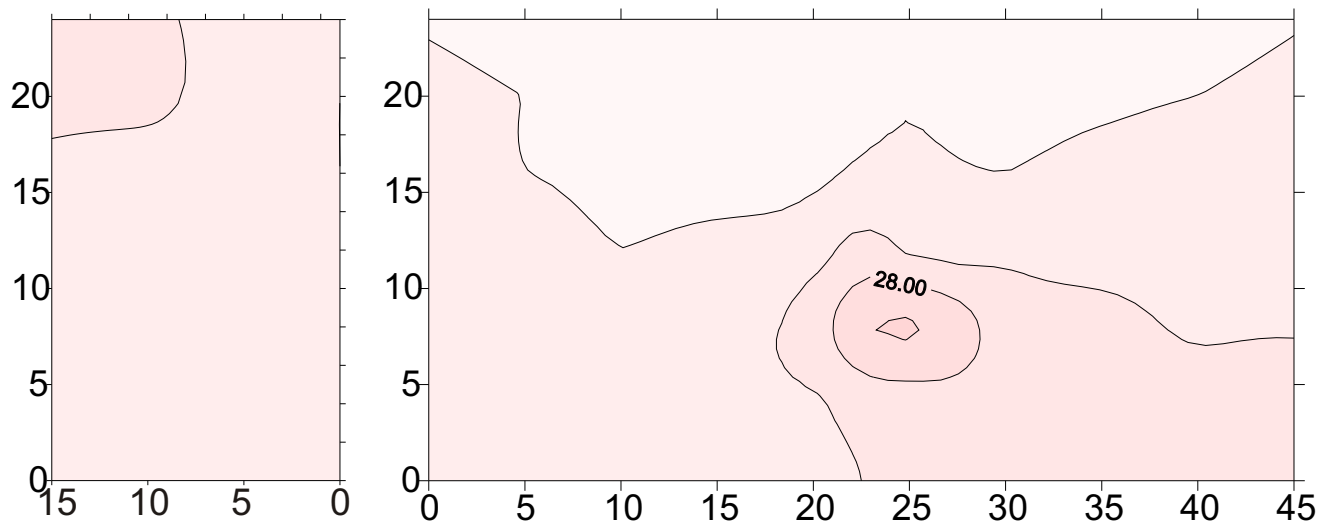


10:10

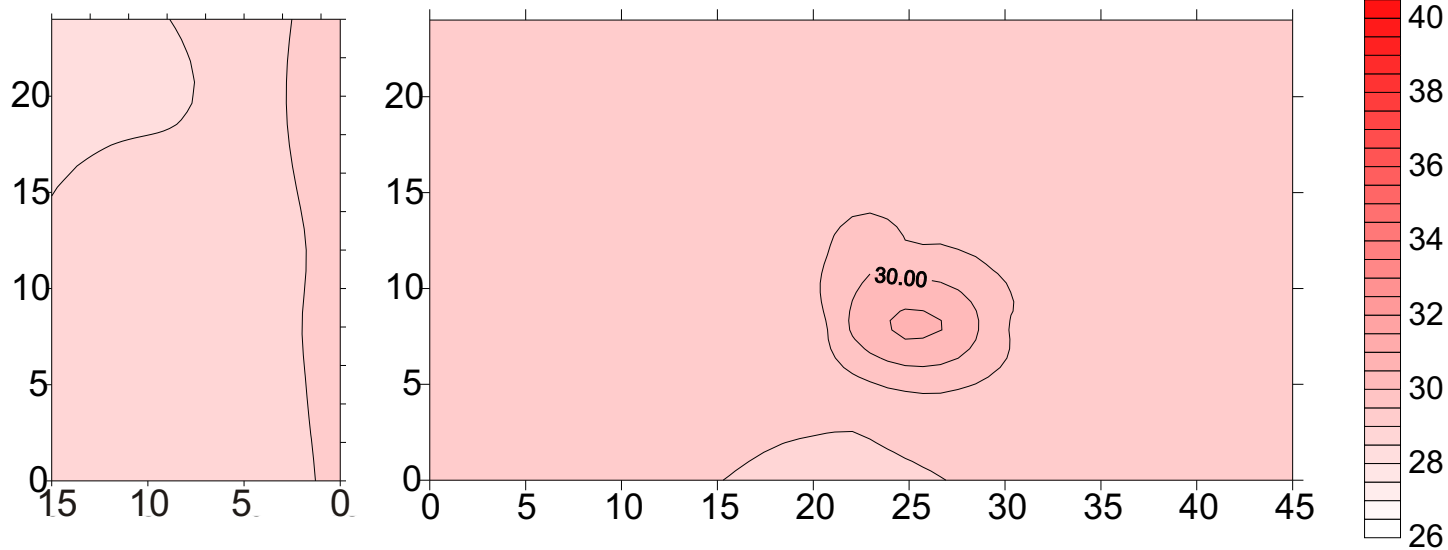


**Figura 9.23 b**

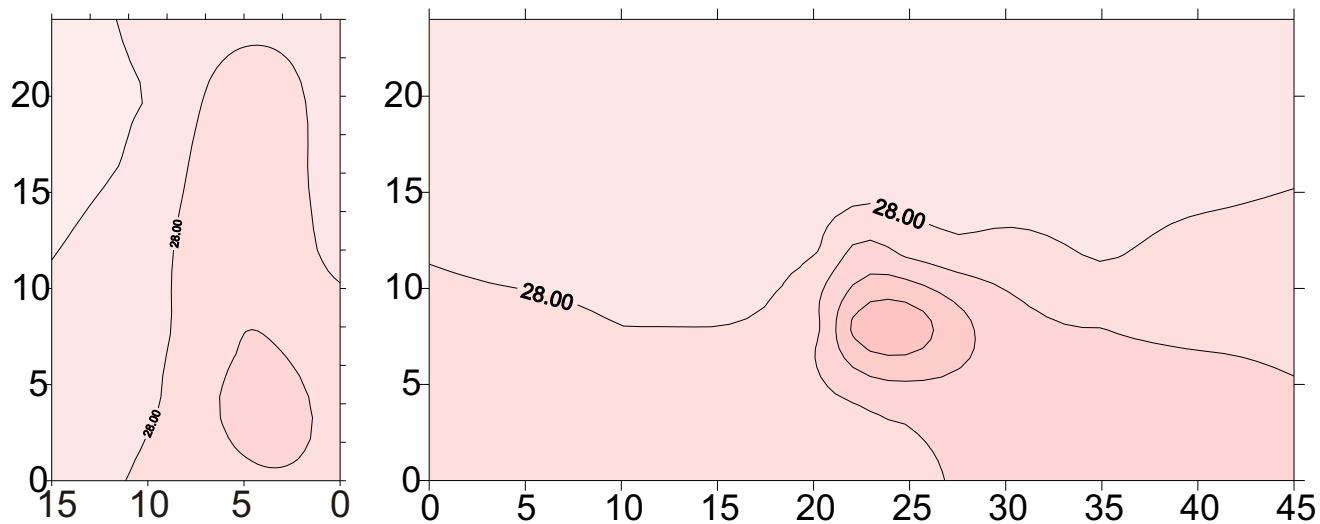
10:20



10:30

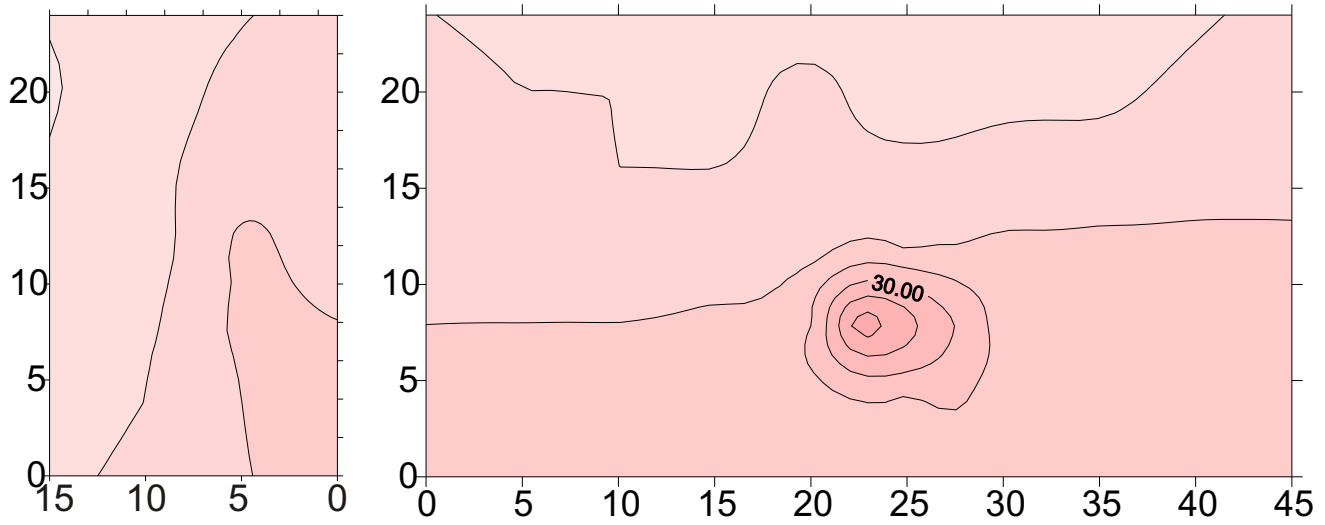


10:40

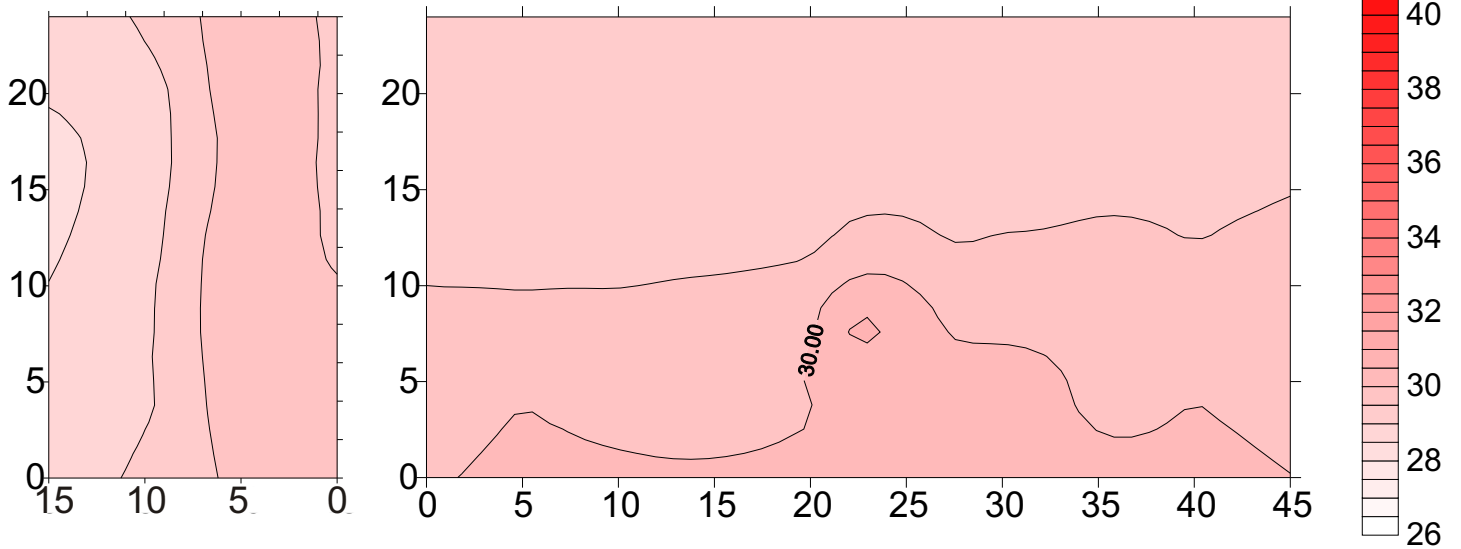


**Figura 9.23 c**

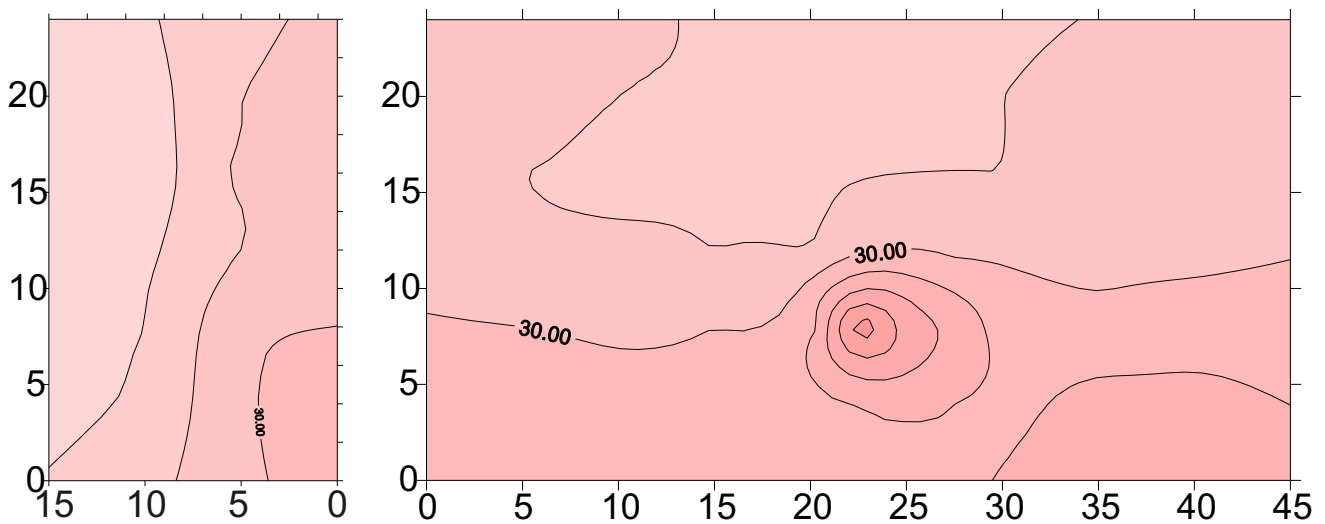
10:50



11:00

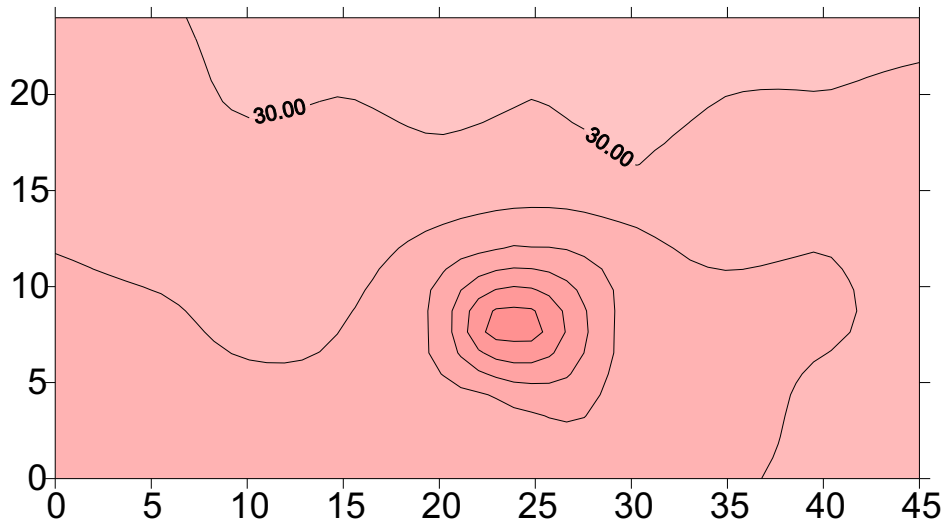
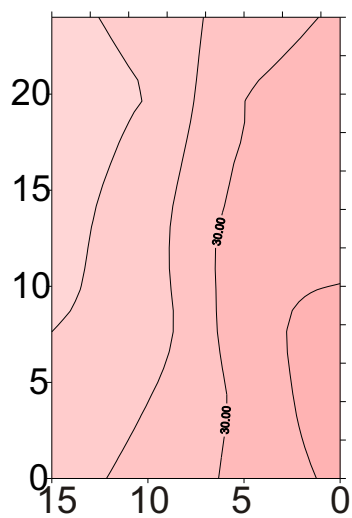


11:10

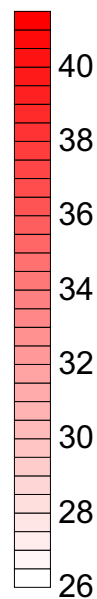
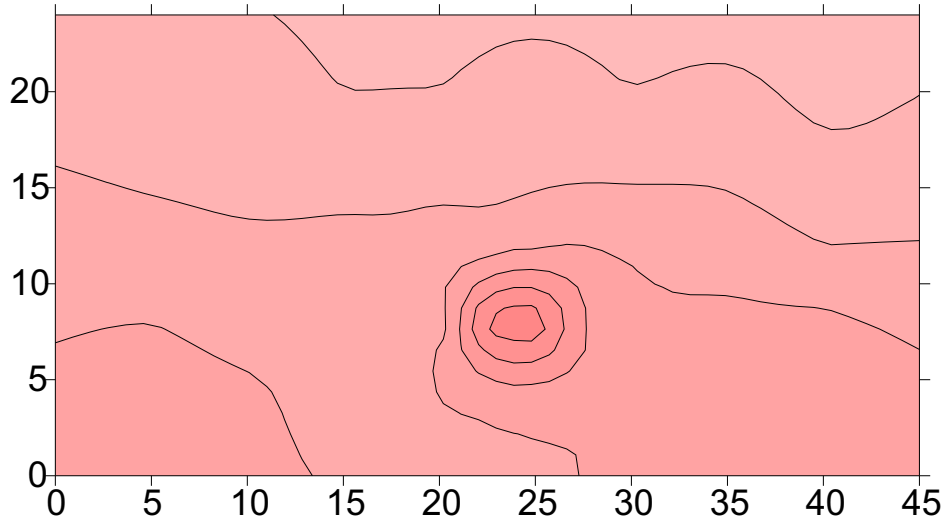
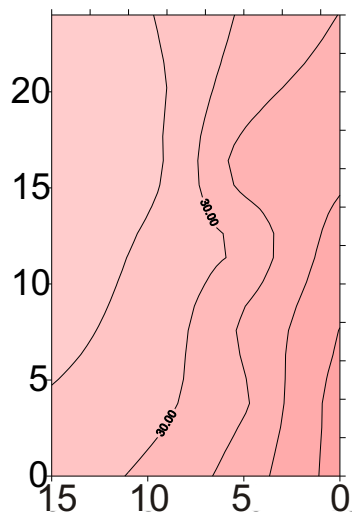


**Figura 9.23 d**

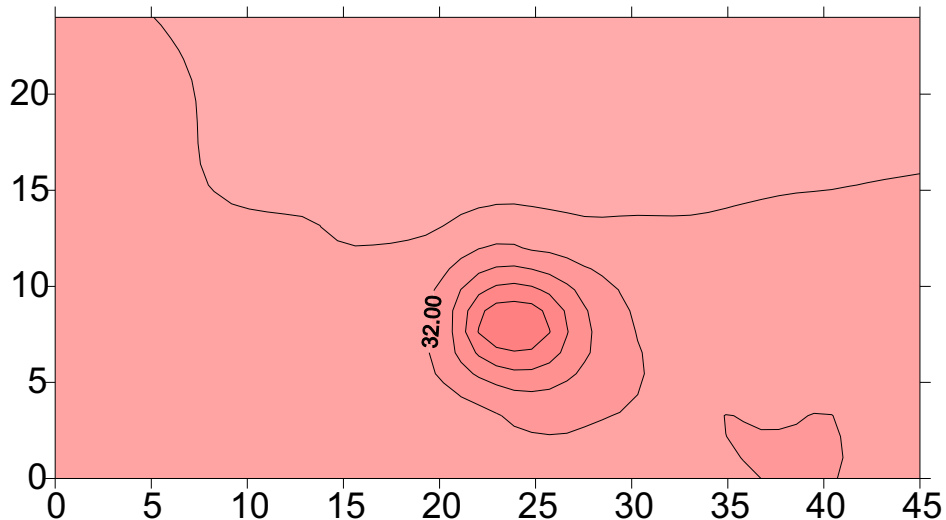
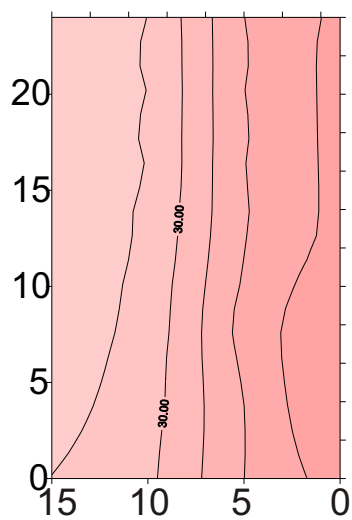
11:20



11:30



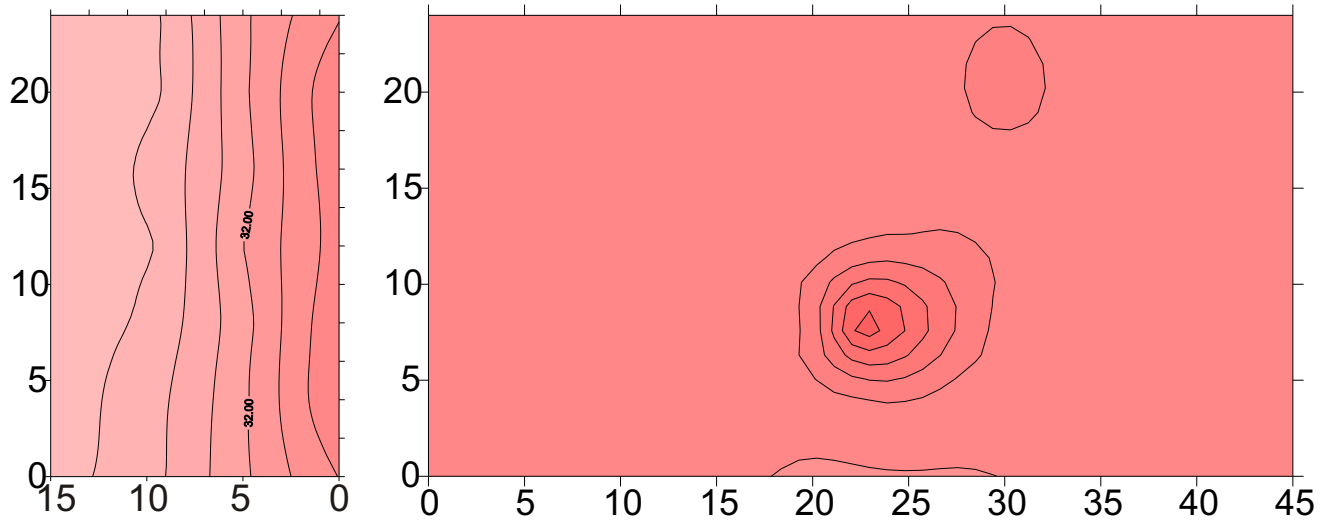
11:40



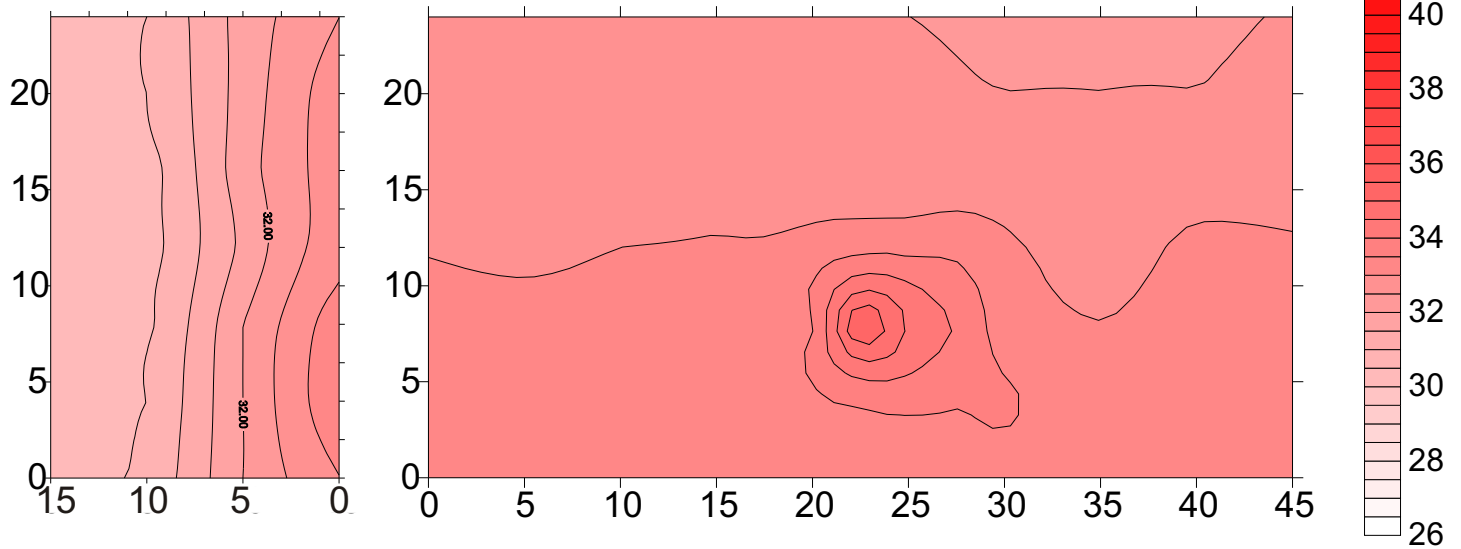


**Figura 9.23 e**

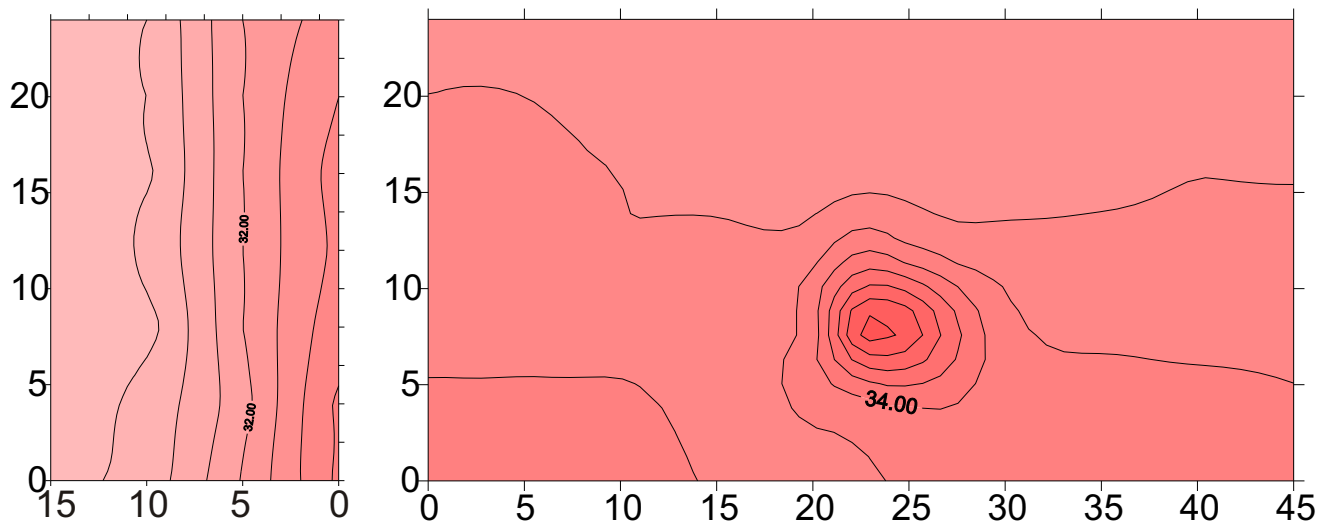
11:50



12:00

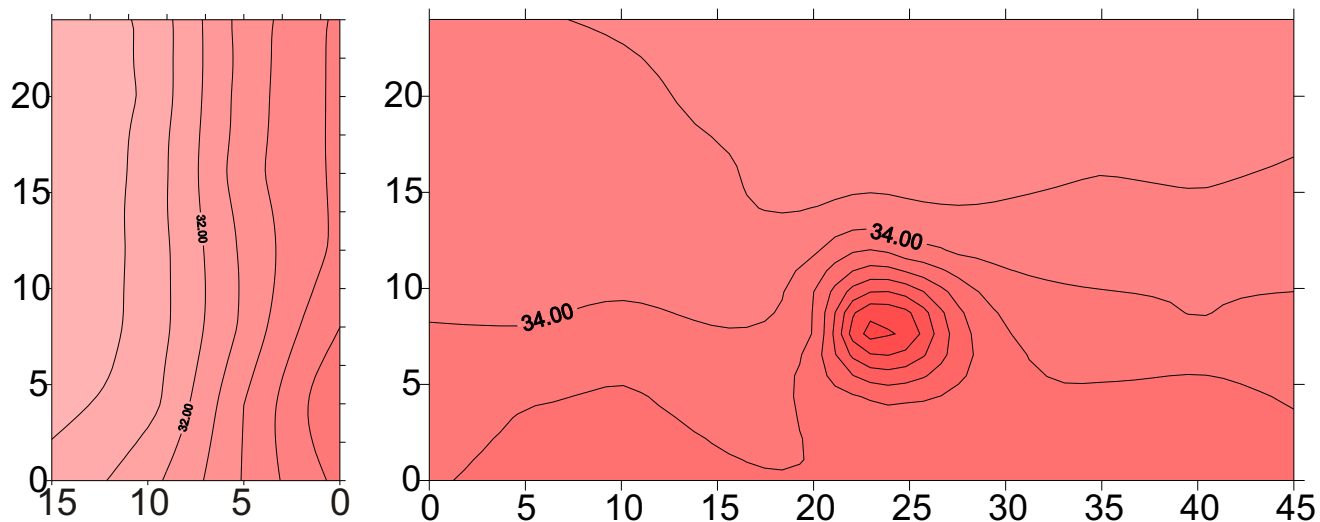


12:10

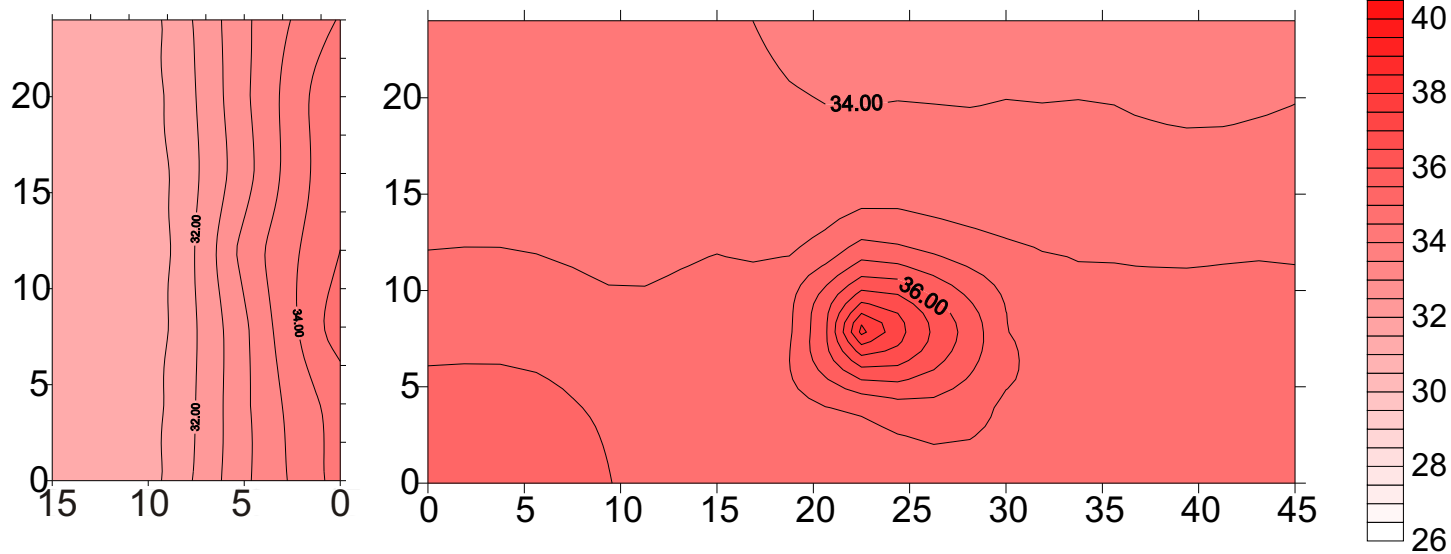


**Figura 9.23 f**

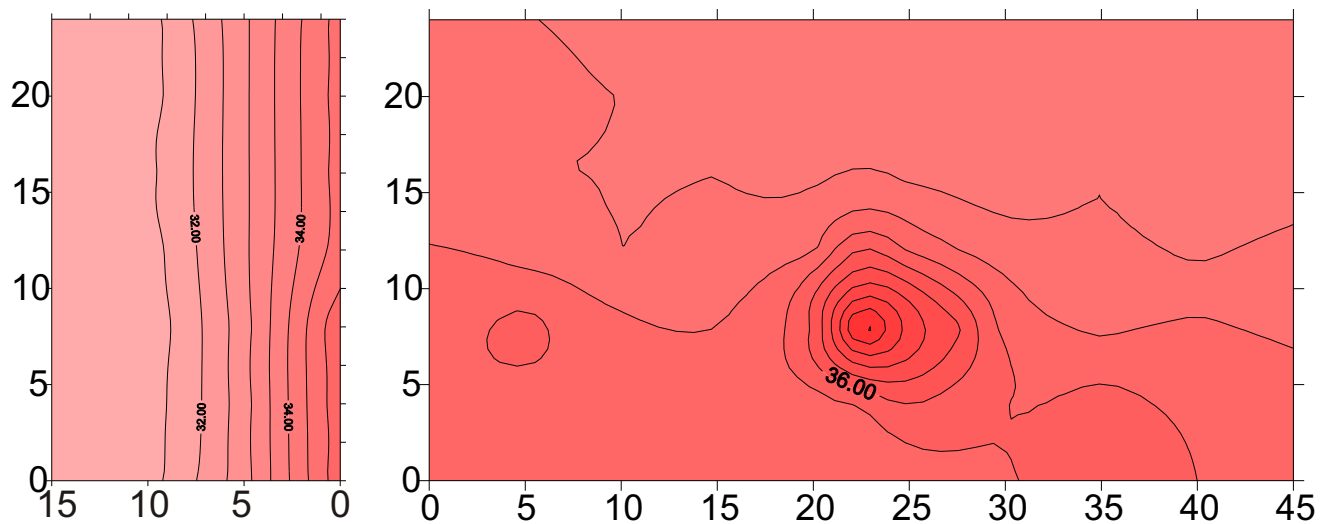
12:20



12:30

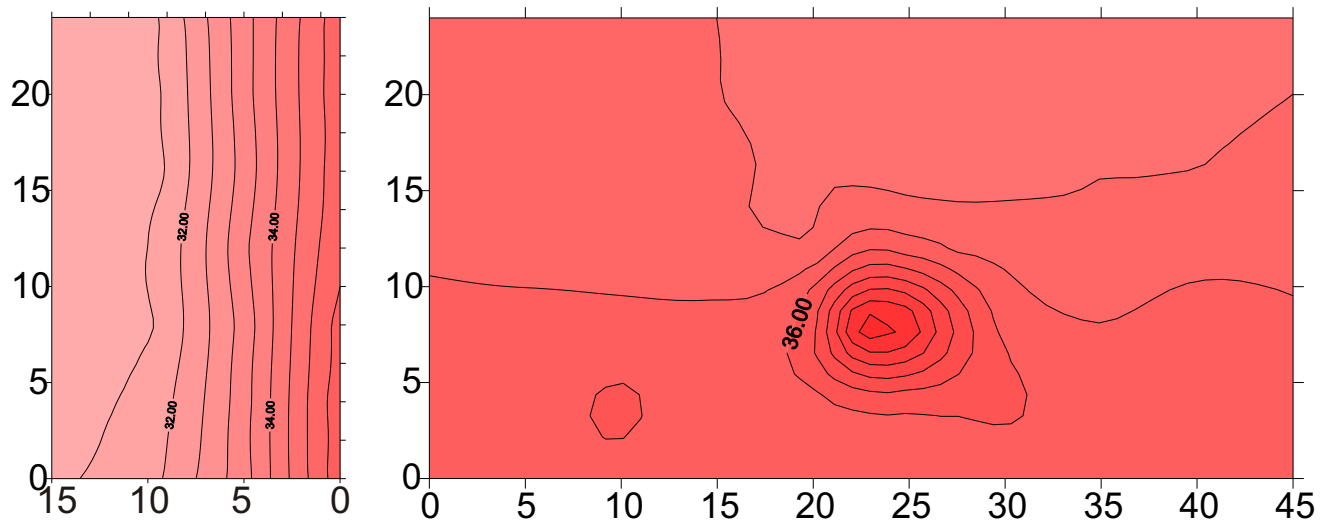


12:40

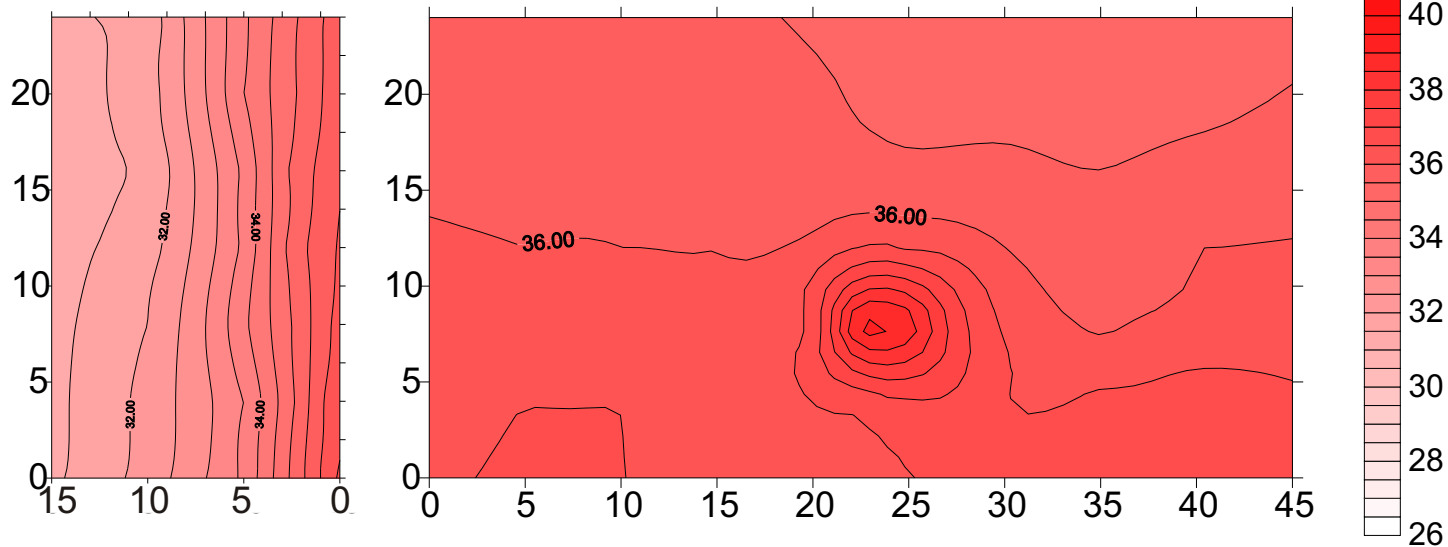


# Figura 9.23 g

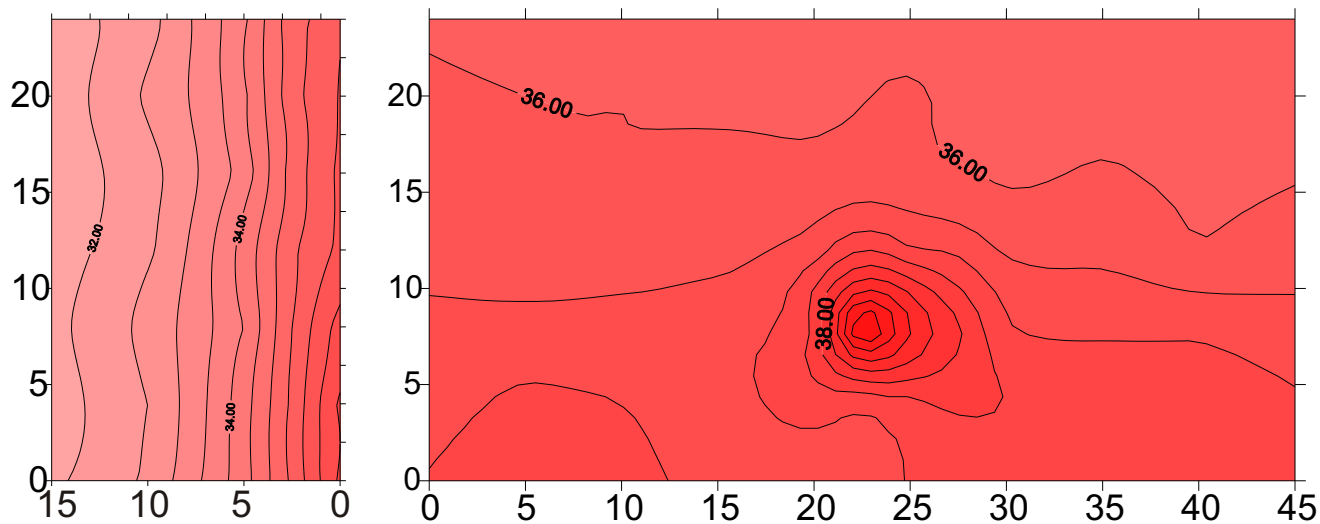
12:50



13:00

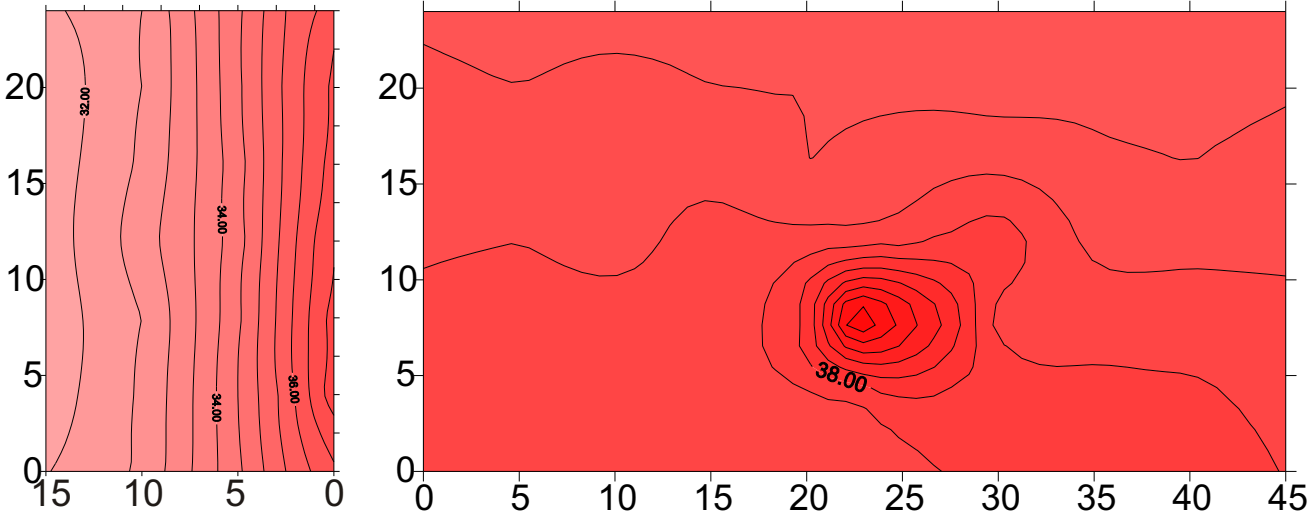


13:10

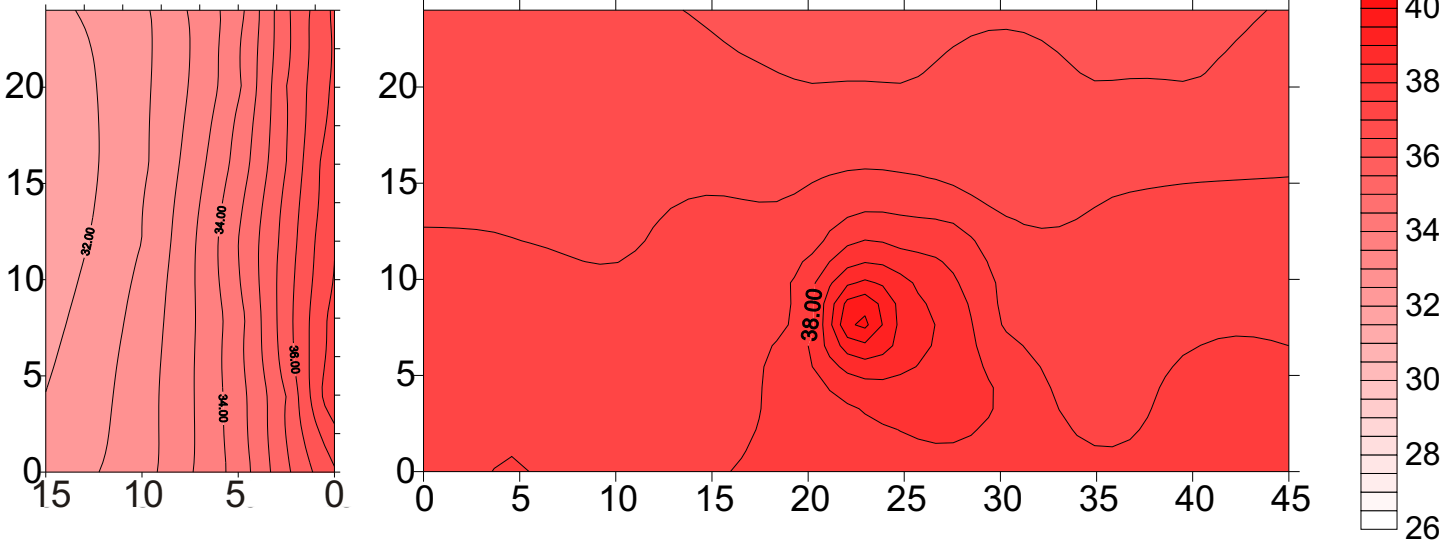


**Figura 9.23 h**

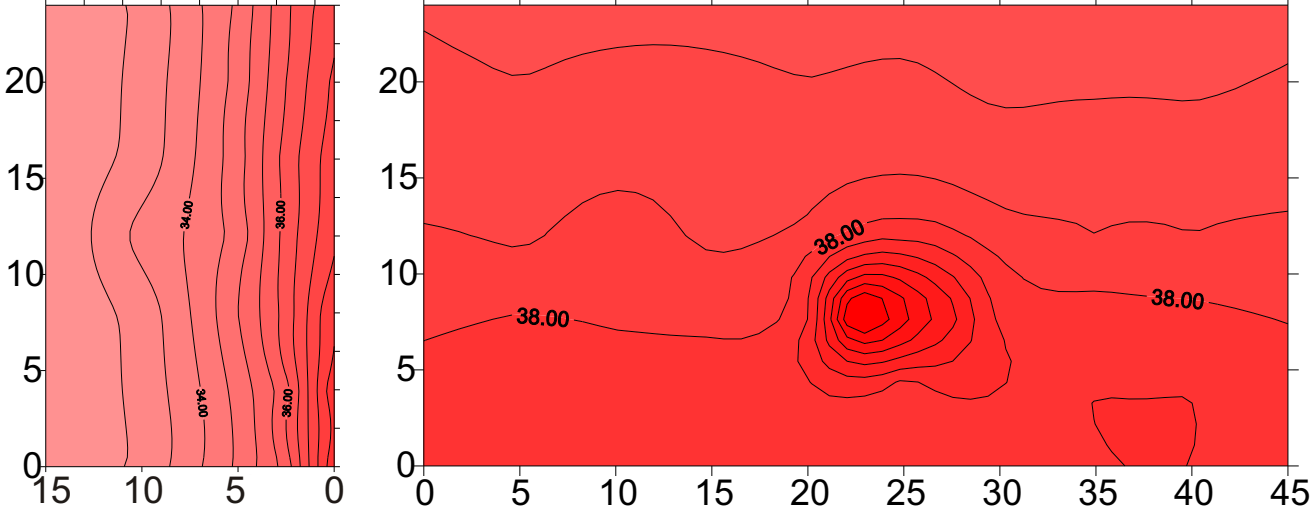
13:20



13:30

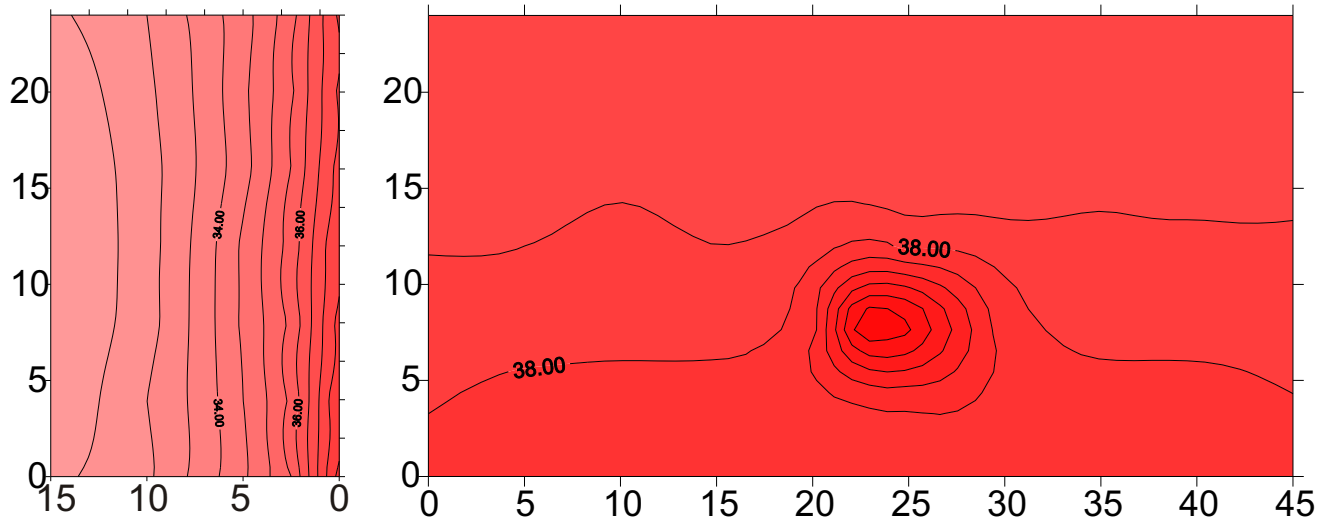


13:40

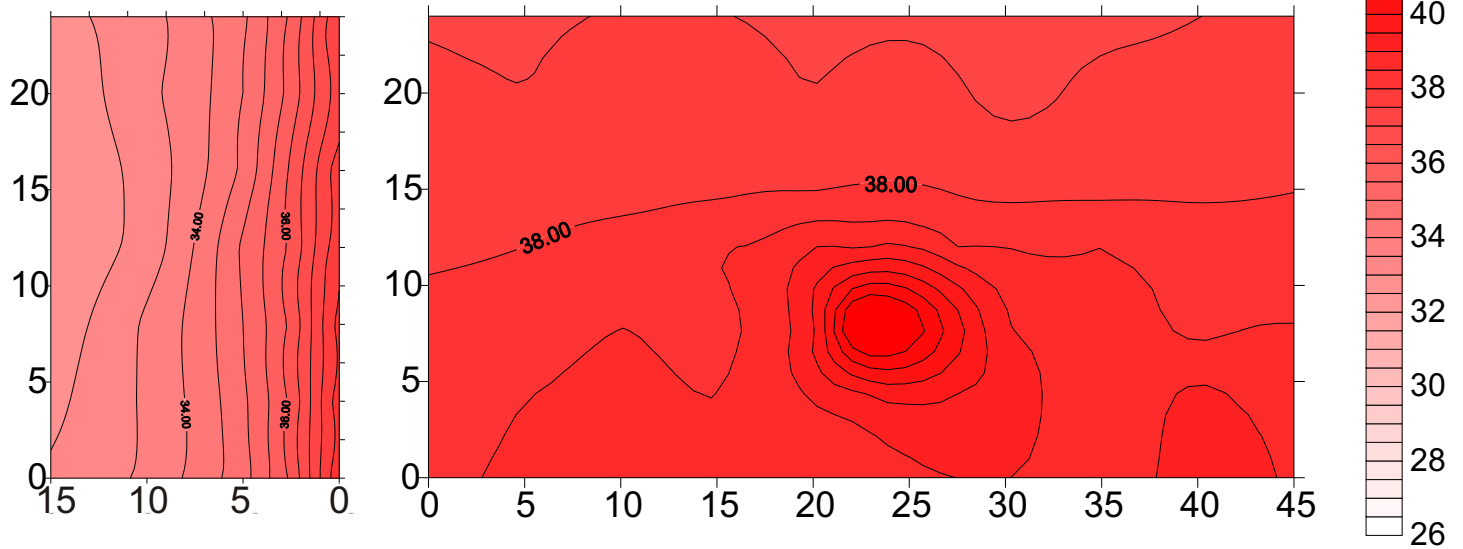


**Figura 9.23 i**

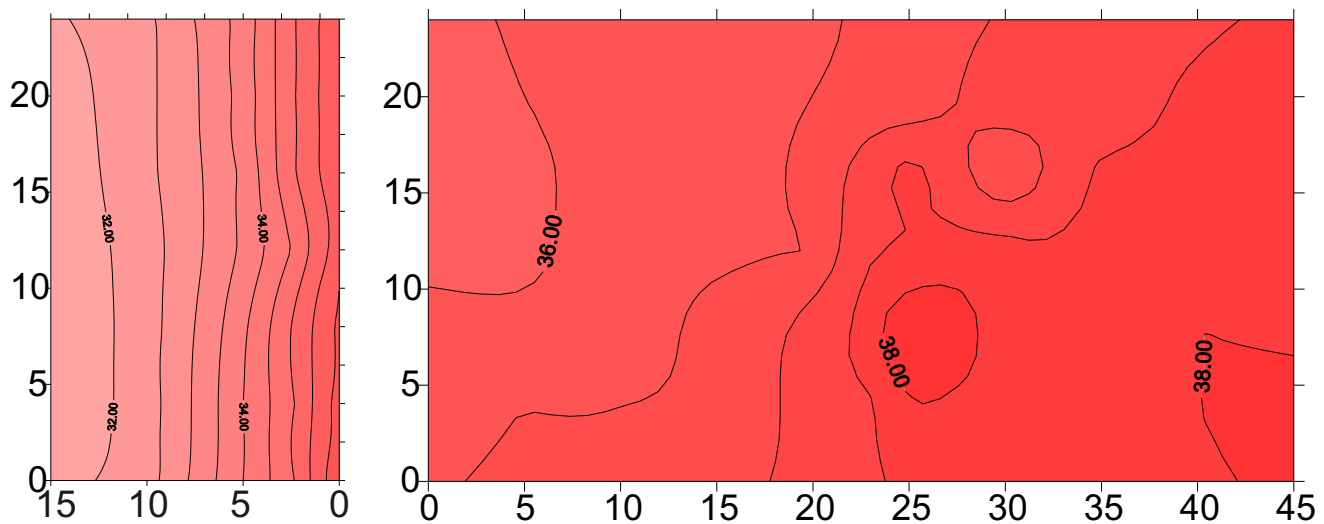
13:50



14:00

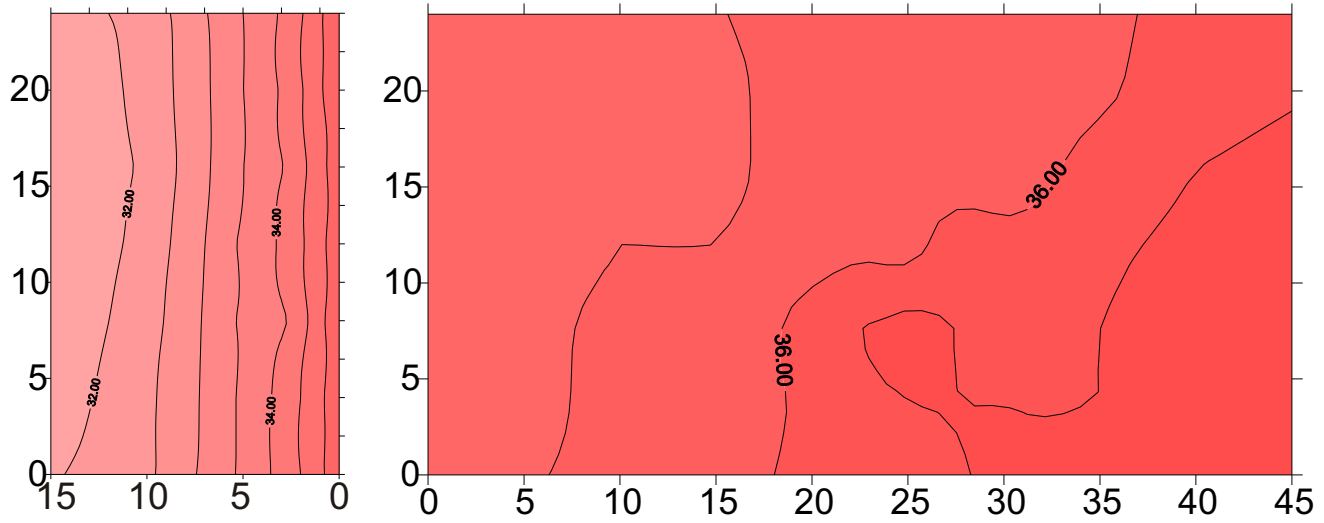


14:10

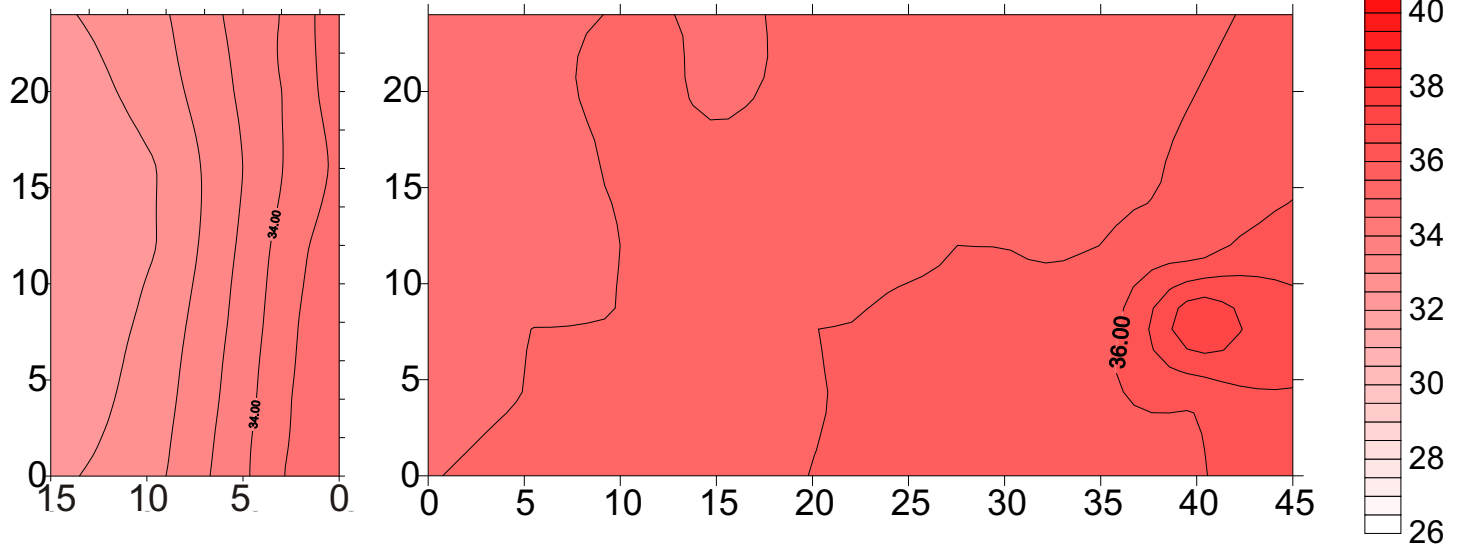


# Figura 9.23 j

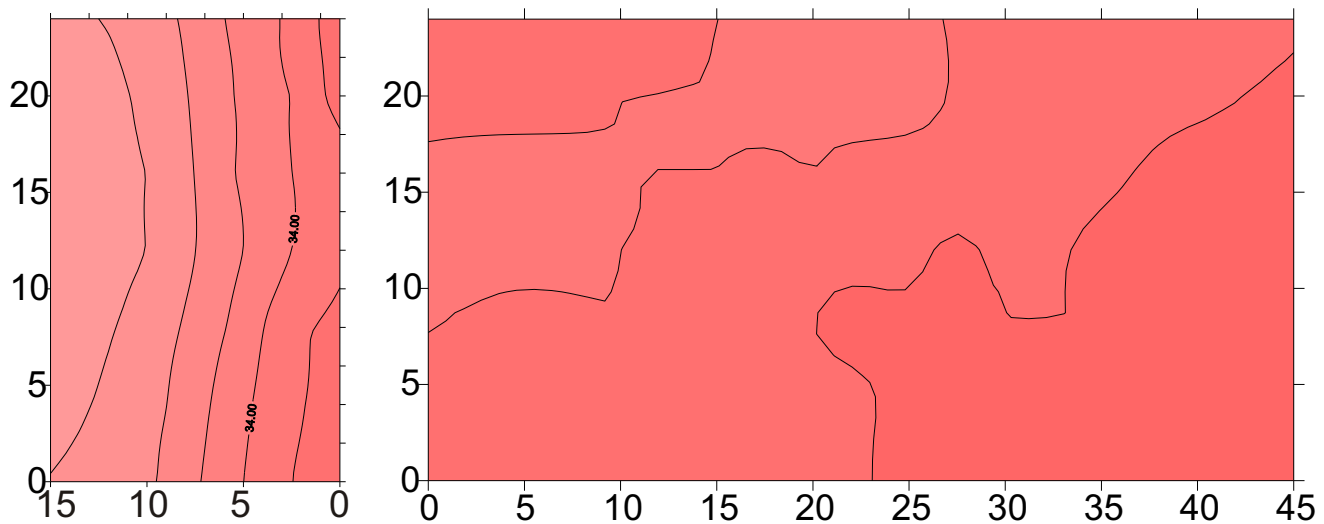
14:20



14:30

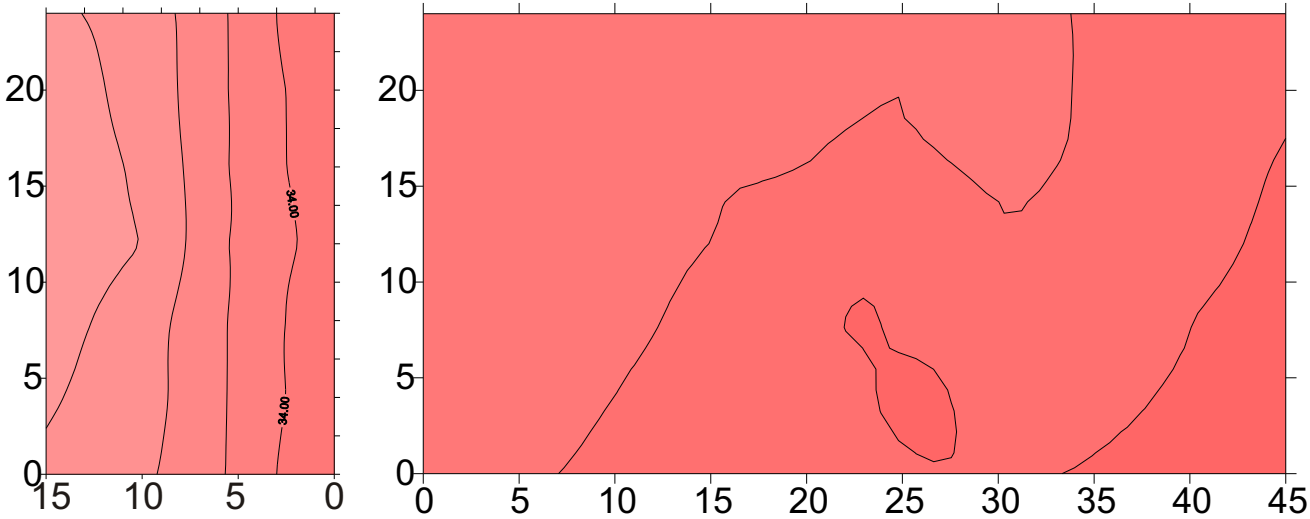


14:40

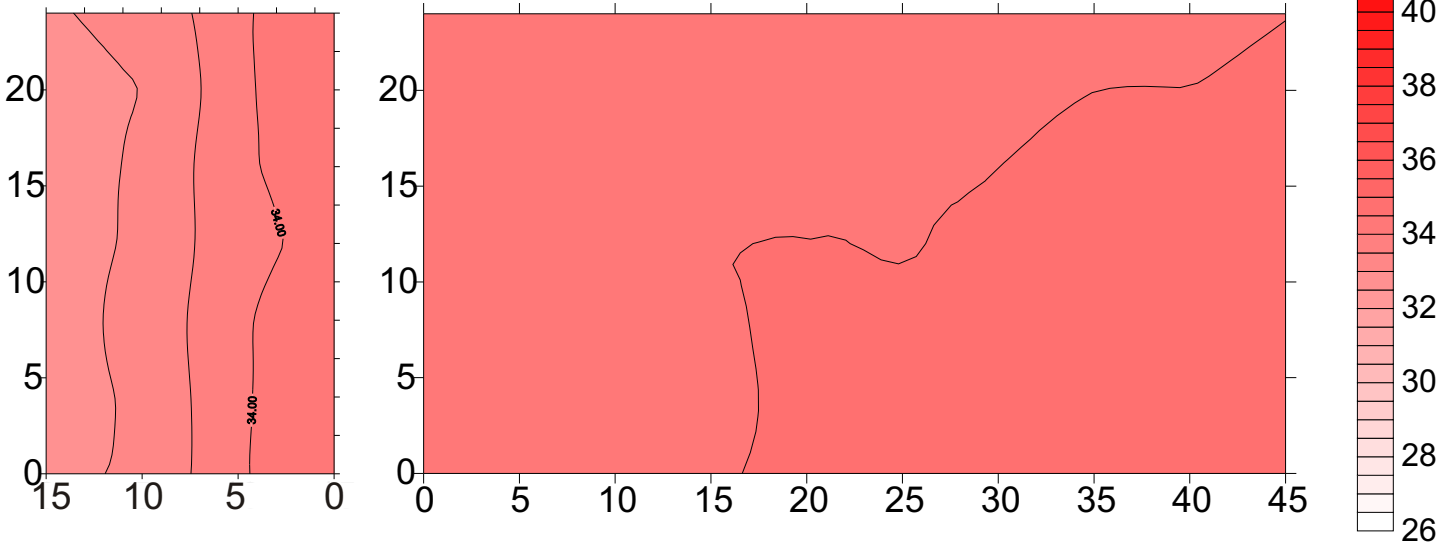


**Figura 9.23 k**

14:50



15:00



## **9.2. Variabilidad litológica y temperatura: incompatibilidad térmica. El Panteón de Hombres Ilustres de Madrid.**

En el caso anterior, el estudio de la dinámica térmica del edificio se realizaba sobre un material que presentaba heterogeneidades, de forma natural, en cuanto a sus propiedades térmicas de superficie. Por el contrario, en este apartado se analizará la dinámica de un edificio en el que las heterogeneidades están generadas por el diseño constructivo del edificio, en este caso por la utilización de filas alternantes de sillares de caliza blanca y negra, sobre un basamento de granito.

El concepto de “incompatibilidad” de los materiales ha sido utilizado por muchos autores (e.g. Aires-Barros et al., 1998; Fort et al., 1998; Cultrone et al., 2001; Gómez-Heras y Fort, 2004) refiriéndose al hecho de que propiedades físicas muy diferentes en materiales adyacentes, podría contribuir a un aumento de su velocidad de deterioro, sin embargo, como para el caso anterior no existen estudios que relacionen la evolución de las temperaturas superficiales con un el grado de deterioro de diferentes zonas del edificio. En este caso se va a estudiar la influencia que puede tener la diferente respuesta térmica de dos materiales adyacentes con albedos muy diferentes y la existencia de fracturas en las aristas de los sillares (realmente, placas gruesas que oscilan entre 10 y 25 cm) que provocan su redondeo.

El Panteón de Hombres Ilustre es uno de los edificios de Madrid que se realizaron dentro de la tendencia de finales del siglo XIX que buscaba el uso de nuevos materiales diferentes a los tradicionales disponibles gracias a las mejoras en las comunicaciones terrestres, concretamente la introducción del ferrocarril (Varas et al., 2003.).

El edificio del actual Panteón de Hombres Ilustres (figura 9.26) es en realidad uno de los restos de lo que inicialmente iba a ser la nueva Basílica de Nuestra Señora de Atocha. Tras la idea de utilizar la Basílica de San Francisco el Grande, que paso a ser propiedad del estado tras las desamortizaciones del siglo XIX, como panteón para el enterramiento de grandes figuras de la cultura y la sociedad civil española, se propuso la idea de construir una nueva basílica en Atocha que incluiría en sus dependencias el espacio necesario para enterramiento de estos personajes.



La reina María Cristina convocó un concurso de proyectos, adjudicándose finalmente la obra al arquitecto Fernando Arbós y Tremanti que inició las obras en 1892. El proyecto inicial neo-bizantino era de una gran suntuosidad. La grandiosidad del proyecto y la desviación de fondos para la Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena hizo que la obra no se llegara nunca a terminar dándose por concluida en 1899.



**Figura 9.26:** Interior del claustro del Panteón de Hombres Ilustres

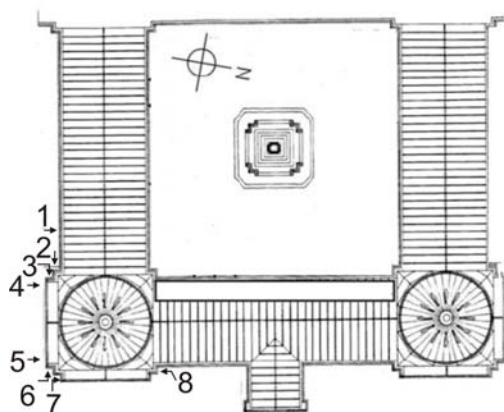
Del proyecto inicial sólo se edificó el claustro, que se habilitó como mausoleo de personalidades políticas y militares, entre las que se encuentran Canovas, Rios Rosas o Canalejas, y el campanario que forma una torre aislada situada actualmente en el interior del colegio Virgen de Atocha de los PP. Dominicos. Estas dos edificaciones se encuentran ubicadas en la manzana formada por las calles Julián Gayarre, Paseo de la Reina Cristina y la Avenida de ciudad de Barcelona, muy cerca de la estación de Atocha.

El edificio principal del claustro esta rodeado de unos jardines, siendo ambos visitables. La titularidad del edificio pertenece a *Patrimonio Nacional* como parte del conjunto del patronato de fundación real de la basílica de Nuestra Señora de Atocha y fue declarado Bien de Interés Cultural en 1992.

La situación del Panteón es relativamente similar a la del Pabellón del CSIC en lo que se refiere a disposición de las fachadas. El Panteón es un claustro formado por tres galerías orientadas aproximadamente al Sur, Este y Norte, Siendo la fachada principal la Este cuyo plano presenta una leve inclinación hacia el Oeste con respecto al Norte (ver figura 9.27).

Como se ha mencionado anteriormente, este es uno de los edificios construidos en la ciudad de Madrid a finales del siglo XIX dentro de una tendencia general de construcción que abandonaba materiales tradicionales como el Granito del Sistema

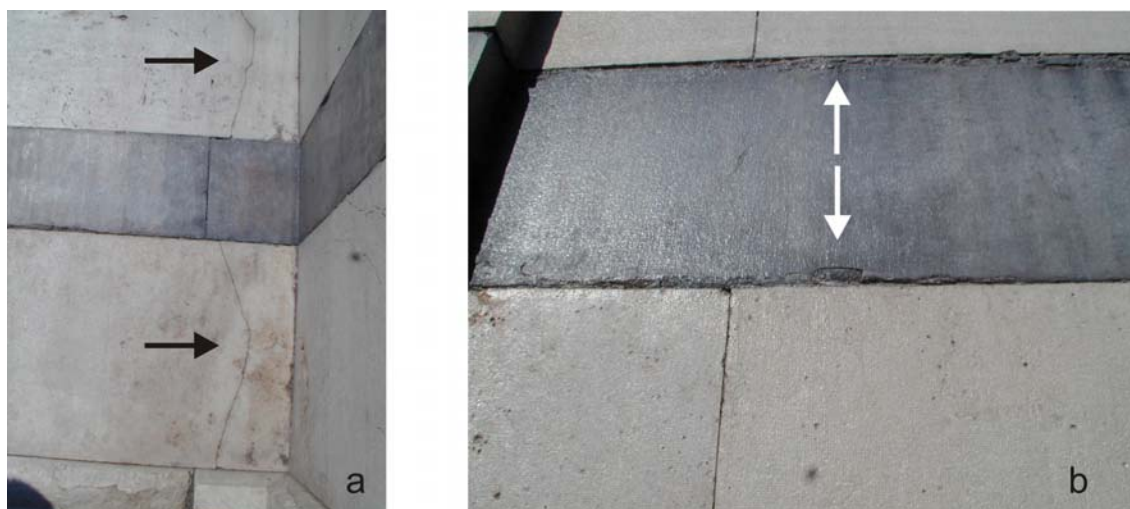
Central o la Caliza de Colmenar para utilizar materiales provenientes de nuevas fuentes. Así, este edificio contiene granito de diversas procedencias, mármol de Macael y mármoles belgas, entre otros. Concretamente los paramentos estudiados están contruidos con una combinación de dos calizas, una blanca procedente de Torrubia (Cuenca) y una segunda negra procedente de Calatorao (Zaragoza).



**Figura 9.27:** Planta del Panteón de Hombres Ilustres y puntos de medida.

El deterioro principal observado en las fachadas exteriores consiste en la existencia de fracturas en el recubrimiento pétreo del edificio (figura 9.28a). Por un lado se observan fisuras verticales que afectan principalmente a los bloques de caliza blanca. Estas fisuras actualmente están inactivas y su distribución diferencial encuentra su causa principal en la diferencia de espesores entre los bloques de caliza blanca (10-15 cm) y los

espesores de caliza negra (25 cm) (Álvarez de Buergo et al., 2004). Por otra parte a una escala más detallada se observan una serie de desprendimientos de material en las aristas de los bloques (figura 9.28b), con morfología de descamados laminares en los que cada capa es de orden milimétrico. En los casos en que están muy desarrollados, provocan un redondeamiento incipiente de los sillares. Esta morfología de deterioro afecta exclusivamente a las aristas de los bloques de caliza negra.



**Figura 9.28:** Tipología del deterioro en las fachadas del Panteón. Fisuración que afecta a bloques enteros de piedra (a) y fisuras en aristas de bloques negros (b).



**Figura 9.29:** Restos de tratamiento de protección formando chorretones en las fachadas del Panteón.

En la década de 1990 se realizaron una serie de trabajos de restauración que incluyeron la aplicación de un tratamiento de protección (figura 9.29). Este tratamiento produce una intensa variación cromática de los sillares, así como un evidente aumento del brillo de las superficies. Este estudio incluyó también la evaluación de la influencia de estos tratamientos en la respuesta térmica y la relación entre su grado de deterioro y la situación en el edificio con respecto a su grado de insolación y evolución de las temperaturas superficiales.

Se seleccionaron ocho puntos de medición en las fachadas Sur y Este del edificio, prestando especial atención a las diferencias de orientación que existen por presentar la fachada una serie de entrantes y salientes en planta. Estos puntos de medida se recogen en la planta del edificio en la figura 9.27. Aparte de estos ocho puntos, se escogió un último punto en la fachada Norte del edificio donde las medidas se realizaron cada hora al observarse que la temperatura era prácticamente constante a lo largo del día.

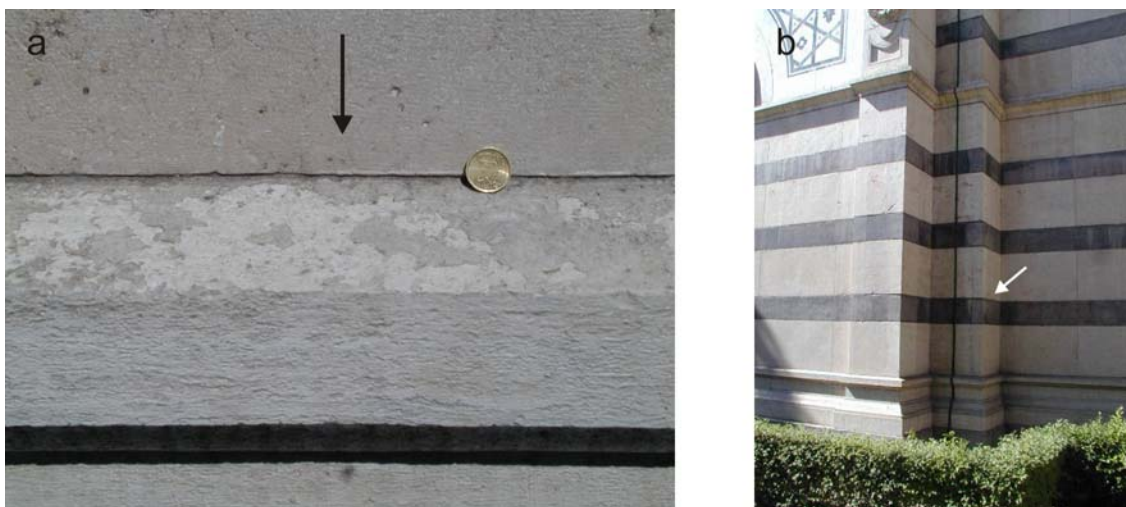
De tal manera, los puntos de medida 1, 4, 5 y 7 tienen orientación Sur, 2 y 3 orientación Oeste, el punto 6 orientación Este y el punto 8 orientación Norte.

Se realizaron medidas del color con un espectrofotómetro (*Minolta CM-2002* con iluminante D65 y ángulo de observación 10 °) de los bloques y de zonas sin tratamiento y con tratamiento para relacionar la diferencia de temperaturas con la diferencia de color y se midió la evolución diaria de las temperaturas entre los sillares claros y oscuros. Las medidas de humedad se desecharon, pues la mayoría de medidas estaban por debajo del límite de detección de aparato debido a la bajísima porosidad de los materiales. También se realizó una toma de medidas en forma de malla para conseguir un mapa de isotermas de una sección de un sillar.

Por ser un monumento visitable, con horas de apertura y cierre, se simplificó la toma de medidas a dos series de dos días a lo largo del año, escogiéndose lo más cercano posible a los solsticios de verano e invierno. Las medidas se realizaron los días 26 y 27 de diciembre de 2003 y 24 y 25 de junio de 2004.

Como en el caso del Pabellón Central del CSIC se descontaron las correcciones estatales que incluye la hora local, pero no se realizó la corrección del meridiano local ni la de la ecuación del tiempo. La toma de medidas de temperatura de superficie se realizó con una metodología similar a la referida en el anterior caso, realizándose una toma de medidas manual de la temperatura en cada uno de los puntos seleccionados en intervalos de 10 minutos en el periodo comprendido desde la hora de apertura a la de cierre del monumento (días 26 de diciembre de 2003 y 24 de junio) a las que se les sumó una última medida realizada a la apertura del monumento los días siguientes.

La medida de las diferencias de temperatura entre zonas tratadas y zonas sin tratar se realizó en una única zona situada en el punto 4 recogido en la figura 9.30a. Para realizar las mediciones de temperatura que permitieron realizar mapas de isotermas, se seleccionó un sillar que recibiese insolación solo por una cara, correspondiente al punto de medida 8 (ver figura 9.30b). La cara frontal expuesta a la insolación tiene una superficie de 34 x 32 cm y un perfil de 70 x 32 cm no expuesto. Para realizar esta cartografía térmica se escogió un día cálido de verano sin nubosidad (8 de julio de 2004) y se tomó una malla de 4 x 4 puntos en el frente del sillar y de 10 x 4 puntos en el perfil del mismo. Se tomaron medidas en cada uno de los puntos cada 10 minutos en un intervalo de tiempo que incluye todo el tiempo durante el que el sillar recibía insolación. Se realizaron otras medidas adicionales en otras zonas del edificio para relacionar las diferentes respuestas térmicas de los materiales con respecto a su inclinación en estructuras decorativas más complejas, como molduras.

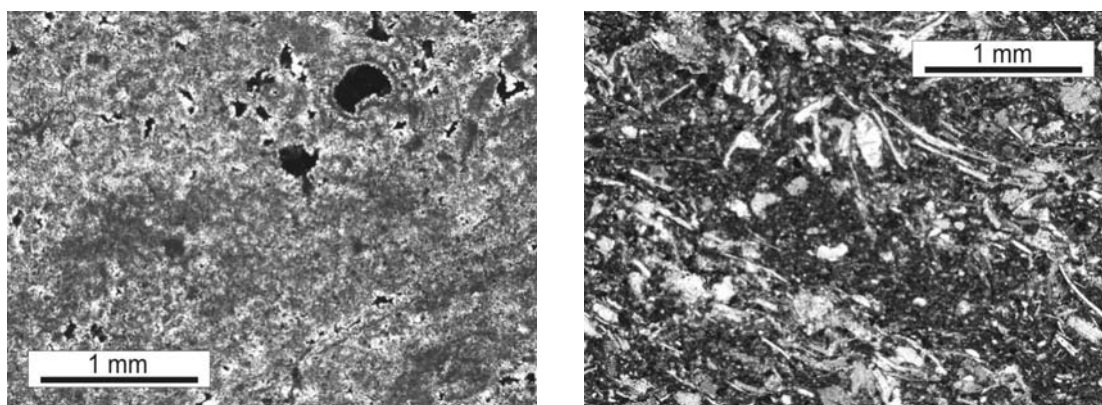


**Figura 9.30:** Punto de medida de diferencias térmicas entre caliza blanca tratada y sin tratar (a) y sillar de caliza negra donde se realizó el mapa de temperaturas en el punto 8 (b).

### 9.2.1. Diferencias litológicas y temperatura.

Gracias a las líneas de ferrocarril, la ciudad de Madrid se comenzó a abastecer en la segunda mitad del siglo XIX con materiales pétreos de toda la geografía española e incluso del extranjero. Entre ellos se encuentran los que forman las fachadas exteriores del Panteón: Una caliza blanca que según la documentación del edificio procede de Torrubia (Cuenca), y una caliza negra procedente de las canteras de Calatorao (Zaragoza).

La caliza blanca (Figura 9.31a) es una pelmicrita de grano fino con oogonios de caráceas, mientras que la caliza negra (Figura 9.31b) es una biomicrita compacta con alternancia de capas con un alto contenido en conchas de moluscos y capas más micríticas sin apenas contenido fósil. Destaca en esta caliza su contenido en restos de materia orgánica, que es la causa del color negro. La estructura laminar, condiciona su modo de fractura en pequeñas lascas de tamaño milimétrico a favor de estos planos de laminación, que dan a la rotura una apariencia de *hojas de cebolla*.



**Figura 9.31:** Fotomicrografías de la caliza blanca de Torrubia (a) y la caliza negra de Calatorao (b).  
Nícoles cruzados

Las muestras de piedra recogida se limitaron a dos pequeñas esquirlas desprendidas, por lo que, aparte de la observación petrográfica, no se pudieron hacer más ensayos sobre muestras del material.

La tabla 9.8 recoge las medidas cromáticas de estos dos tipos de caliza en cada uno de los puntos de medida seleccionados.



**Tabla 9.8:** Parámetros cromáticos de las calizas negra y blanca del Panteón

	Caliza negra					Caliza blanca				
	L	a*	b*	WI	YI	L	a*	b*	WI	YI
1	58 ± 2	0,9 ± 0,8	2,8 ± 1,1	19 ± 4	7 ± 3	74 ± 1	2,4 ± 0,3	8,9 ± 1,2	16 ± 5	16 ± 2
2	57 ± 2	2,1 ± 0,4	4,7 ± 0,5	14 ± 3	11 ± 1	79 ± 2	1,4 ± 0,2	7,5 ± 0,6	27 ± 2	13 ± 1
3	59 ± 3	1,8 ± 0,5	4,7 ± 0,6	16 ± 2	11 ± 1	79 ± 2	1,5 ± 0,4	8,1 ± 0,7	24 ± 5	14 ± 1
4	56 ± 3	0,4 ± 0,4	1,0 ± 0,8	22 ± 3	2 ± 2	74 ± 1	2,6 ± 0,1	9,5 ± 0,2	14 ± 1	18 ± 1
5	50 ± 2	0,8 ± 0,3	2,5 ± 0,4	13 ± 1	7 ± 1	72 ± 1	2,5 ± 0,1	9,1 ± 0,4	14 ± 2	17 ± 1
6	54 ± 1	1,5 ± 0,1	5,2 ± 0,4	11 ± 1	12 ± 1	73 ± 2	1,9 ± 0,3	10,1 ± 1,1	12 ± 5	19 ± 2
7	49 ± 6	2,4 ± 0,8	4,2 ± 1,7	10 ± 2	11 ± 4	72 ± 2	2,4 ± 0,3	11,1 ± 0,6	7 ± 3	21 ± 1
8	53 ± 3	0,9 ± 0,2	3,9 ± 0,9	13 ± 1	10 ± 2	69 ± 1	2,4 ± 0,1	10,8 ± 0,6	7 ± 2	21 ± 1
med.	55	1,3	4,0	15	9	74	2,1	9,0	15	17
d.e	4	0,8	2,0	4	4	4	0,5	1,0	7	3

La figura 9.32, situada al final del apartado, recoge la evolución de las temperaturas en los distintos puntos de medida durante los días seleccionados. Como en el caso anterior del Pabellón Central del consejo, se observa que existe una serie de ciclos de variación de temperaturas de diversos rangos, desde el ciclo estacional hasta los ciclos de corto rango, producidos por viento, nubes o sombras de elementos sobre el edificio.

Las condiciones atmosféricas de los días de medida fueron favorables. Las medidas de verano correspondieron a un día con nubosidad en pequeños parches ocasionales, en un día con unos niveles de contaminación moderados. Las medidas de invierno se tomaron en un día muy claro con viento en rachas después de una noche fría (la noche anterior las temperaturas fueron algo inferiores a 0°C). Las temperaturas de ambos materiales difieren enormemente a causa de su albedo muy diferente. La caliza negra absorbe mucha más radiación que la caliza blanca en función de su albedo mucho menor, presentando en todos los casos una temperatura mucho mayor que la caliza blanca. Esta diferencia depende, obviamente, de la cantidad de radiación incidente, así, como se discutió anteriormente en el caso del edificio central del CSIC, la irradiancia sobre las fachadas orientadas al Sur es mayor en invierno debido a que los rayos solares inciden más perpendicularmente a la superficie. Concretamente, en la posición más cenital sobre la fachada Sur el sol incide con un ángulo de hasta 16,9° en las medidas de verano, mientras que en las de invierno el ángulo es de unos 60°. Así, los meses de invierno condicionan mayores diferencias de temperatura entre las litologías, mayores gradientes térmicos para un mismo punto y mayores diferencias con respecto a las temperatura ambiente, lo que concuerda con los datos obtenidos para las temperaturas superficiales en regímenes fríos en el laboratorio (Ver capítulo 7). Esto confirma la tesis

general de que los regímenes térmicos en un material pétreo de construcción (y por tanto los regímenes que deberíamos usar en la experimentación) no se corresponden con un calentamiento convectivo a partir de una masa de aire con una temperatura correspondiente a la temperatura ambiental.

El diseño del edificio con entrantes y salientes, favorece un régimen de temperaturas complejo en los sillares que hacen esquina, ya que en muchos de los casos (como por ejemplo en los sillares marcados como 2 y 3) la temperatura superficial de los bloques se incrementa primero por conducción (debido a que su cara perpendicular está sufriendo insolación mientras que la suya no), lo que da lugar a un régimen aproximadamente lineal de calentamiento, para luego calentarse por radiación al recibir la insolación directa en esa cara.

De manera análoga a lo expuesto para el Pabellón Central del CSIC, la evolución térmica se ha resumido en una serie de parámetros que aparecen recogidos en las tablas 9.9 y 9.10.

**Tabla 9.9:** Parámetros de los ciclos térmicos del Panteón; sillares 1 a 4

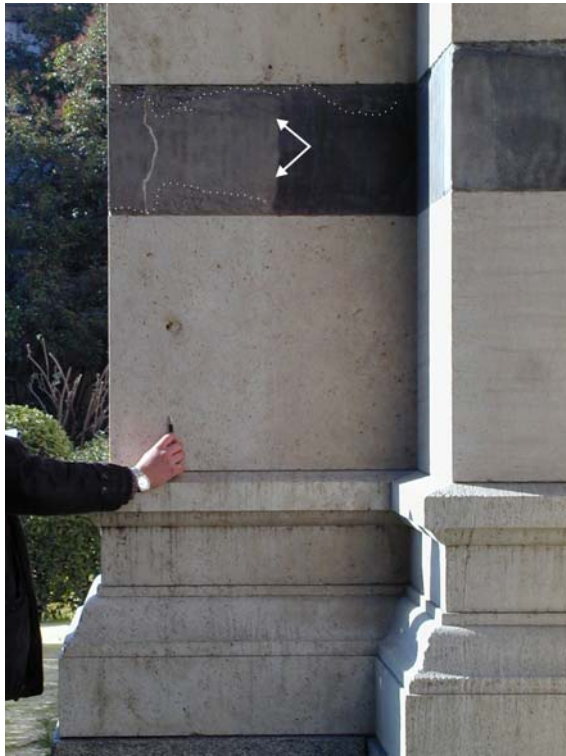
		1		2		3		4	
		Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.
Verano	Horas insolación/día	4,00		3,17		3,50		6,00	
	T. máxima	35,6	34	39,9	35,5	39,9	39,5	36,6	33,5
	T. mínima	24,4	23,4	25,3	24,8	25,3	24,8	23,9	23,6
	$\Delta T$ máxima y mínima	11,2	10,6	14,6	10,7	14,6	14,7	12,7	9,9
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	1,26		1,74		1,56		2,21	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	2	3	6	3	4	5	1	1
	Ciclos/horas insolación	1,50	1,50	2,21	2,21	1,71	1,71	1,33	1,33
Invierno	Horas insolación/día	5,83		4,33		4,50		6,83	
	T. máxima	34,1	29,9	29,7	22,2	26,3	20,7	30,5	23,0
	T. mínima	6,9	5,8	6,3	6,3	6,5	6,3	6,5	5,9
	$\Delta T$ máxima y mínima	27,2	24,1	23,4	15,9	19,8	14,4	24,0	17,1
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	3,1		3,1		2,2		4,8	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	9	9	7	9	6	3	7	6
	Ciclos/horas insolación	1,37	1,54	1,38	1,38	1,11	1,33	1,17	1,32
Valores medios	Horas insolación/día	4,91		3,75		4,00		6,41	
	$\Delta T$ máxima y mínima	19,2	17,3	19,0	13,3	17,2	14,5	18,3	13,5
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	2,2		2,4		1,9		3,5	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min cada día	5,5	6,0	6,5	6,0	5,0	4,0	4,0	3,5
	Ciclos/horas insolación	1,43	1,52	1,79	1,79	1,41	1,52	1,25	1,32

Con respecto a las estaciones, como se ha comentado anteriormente, en invierno se producen las mayores diferencias, especialmente en las caras Sur, tanto entre los sillares claros y oscuros, como entre la máxima y mínima temperatura alcanzada por cada sillar, que llegan a diferencias de temperatura de hasta 27,2 °C, lo que asumiendo un valor teórico de dilatación para la caliza de  $5,4 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Hodgman, 1961) supone una deformación máxima diaria de casi 150  $\mu\text{m}$  por metro de sillar. Sin embargo, la ciclicidad horaria es, en general, mayor en verano que en invierno. Esto puede deberse a que la nubosidad en verano fue sensiblemente mayor que en invierno. Los valores más altos de ciclos por hora de insolación se encuentran relacionados con los regímenes más complejos de insolación. Por un lado los sillares 2 y 3, que sufren los distintos modos de calentamiento antes referidos (primero conducción y luego radiación) y los sillares en 6 y 7, que en este caso tienen árboles en la proximidad, generando un efecto similar a lo observado en el Pabellón central del CSIC.

**Tabla 9.10:** Parámetros de los ciclos térmicos del Panteón; sillares 5 a 8

		5		6		7		8	
		Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.	Ngr.	Bln.
Verano	Horas insolación/día	4,67		5,00		4,17		0,00	
	T. máxima	36,5	33,1	34,3	33,2	34,5	32,8	32,4	31,6
	T. mínima	23,8	23,5	25,1	23,9	24,8	24,4	25,0	24,0
	$\Delta T$ máxima y mínima	12,7	9,6	9,2	9,3	9,7	8,4	7,4	7,6
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	2,07		0,99		1,14		1,05	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	3	0	1	1	0	0	0	0
	Ciclos/horas insolación	1,29	1,07	1,4	1,4	1,20	0,96	0	0
Invierno	Horas insolación/día	7,50		2,83		4,83		0	
	T. máxima	31,3	23,7	15,5	13,9	22,0	18	8,2	8
	T. mínima	7,2	6,5	5,9	5,8	3,3	3,4	4,4	4,4
	$\Delta T$ máxima y mínima	24,1	17,2	9,6	8,1	18,7	14,6	3,8	3,6
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	5,0		1,2		0,8		0,2	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min.	9	5	1	1	6	2	2	2
	Ciclos/horas insolación	1,07	1,33	1,41	1,41	1,45	1,86	0	0
Valores medios	Horas insolación/día	6,08		3,91		4,50		0,00	
	$\Delta T$ máxima y mínima	18,4	13,4	9,4	8,7	14,2	11,5	5,6	5,6
	$\Delta T$ medio Ngr. – Bln.	3,53		1,09		0,97		0,62	
	Número pendientes mayores 2°C/10 min cada día	6,0	2,5	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0	1,0
	Ciclos/horas insolación	1,18	1,20	1,40	1,40	1,32	1,41	0	0





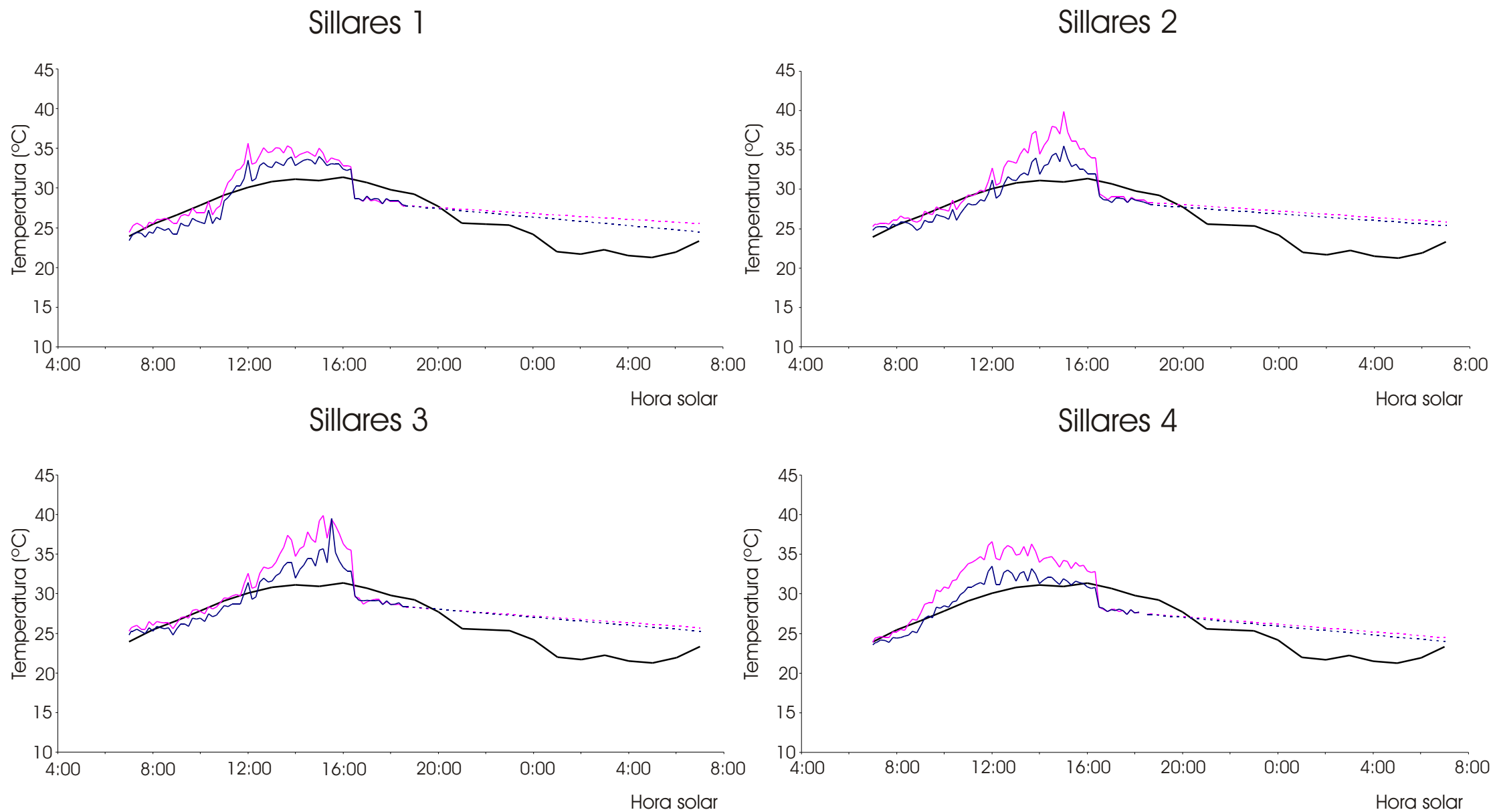
**Figura 9.33:** Deterioro en el sillar 6 levemente resaltado por línea de puntos

Como en el caso anterior, existe una correlación directa entre los sillares que presentan un valor alto de ciclos por hora y el grado de deterioro de los sillares. Así por ejemplo la figura 9.33 muestra el sillar de caliza negra situado en el punto 6, donde se puede observar uno de los mayores grados de redondeamiento de los sillares debido a este descamado en las esquinas.

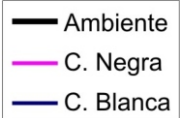
La ausencia de criterios de fracturación en estas morfologías impide un diagnóstico tan preciso como el obtenido en el caso del Pabellón Central del CSIC, sin embargo, esta relación existente entre la evolución térmica y el

grado de deterioro permite suponer con bastante certeza la fatiga térmica ha sido un factor coadyuvante en su formación.

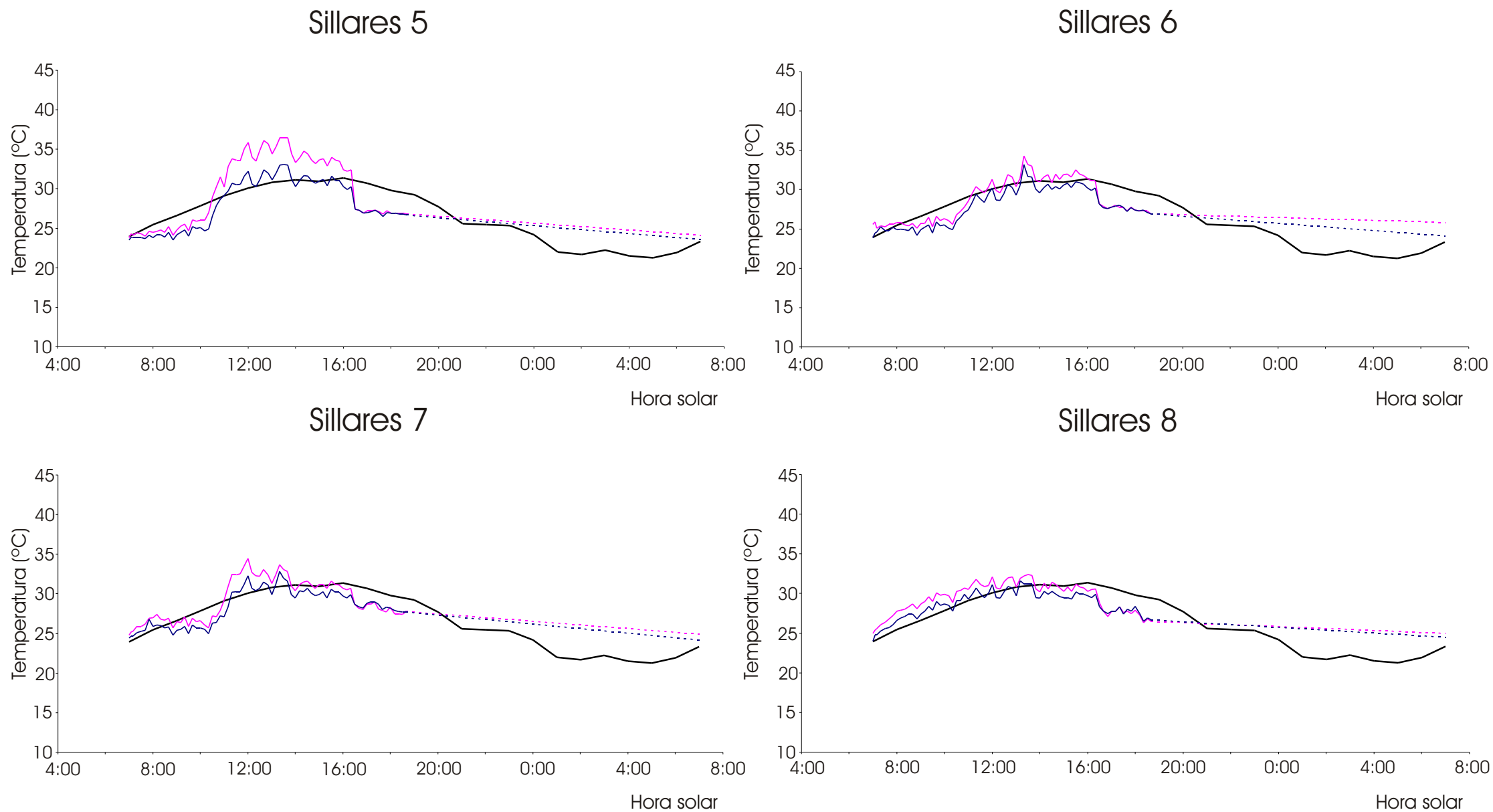
**Figura 9.32 a**



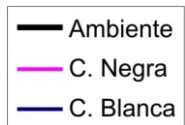
Temperaturas recogidas 24/25 junio 2004



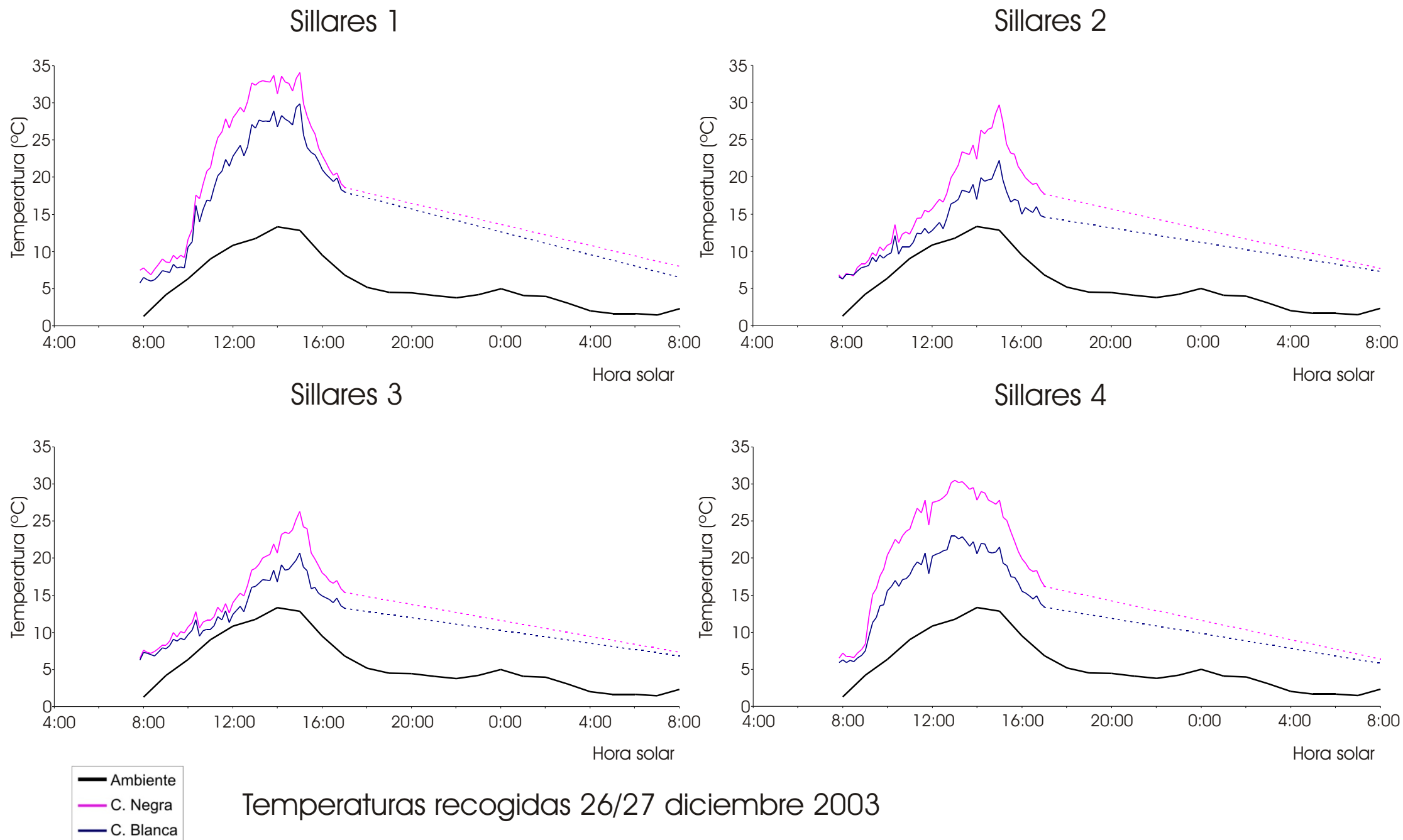
**Figura 9.32 b**



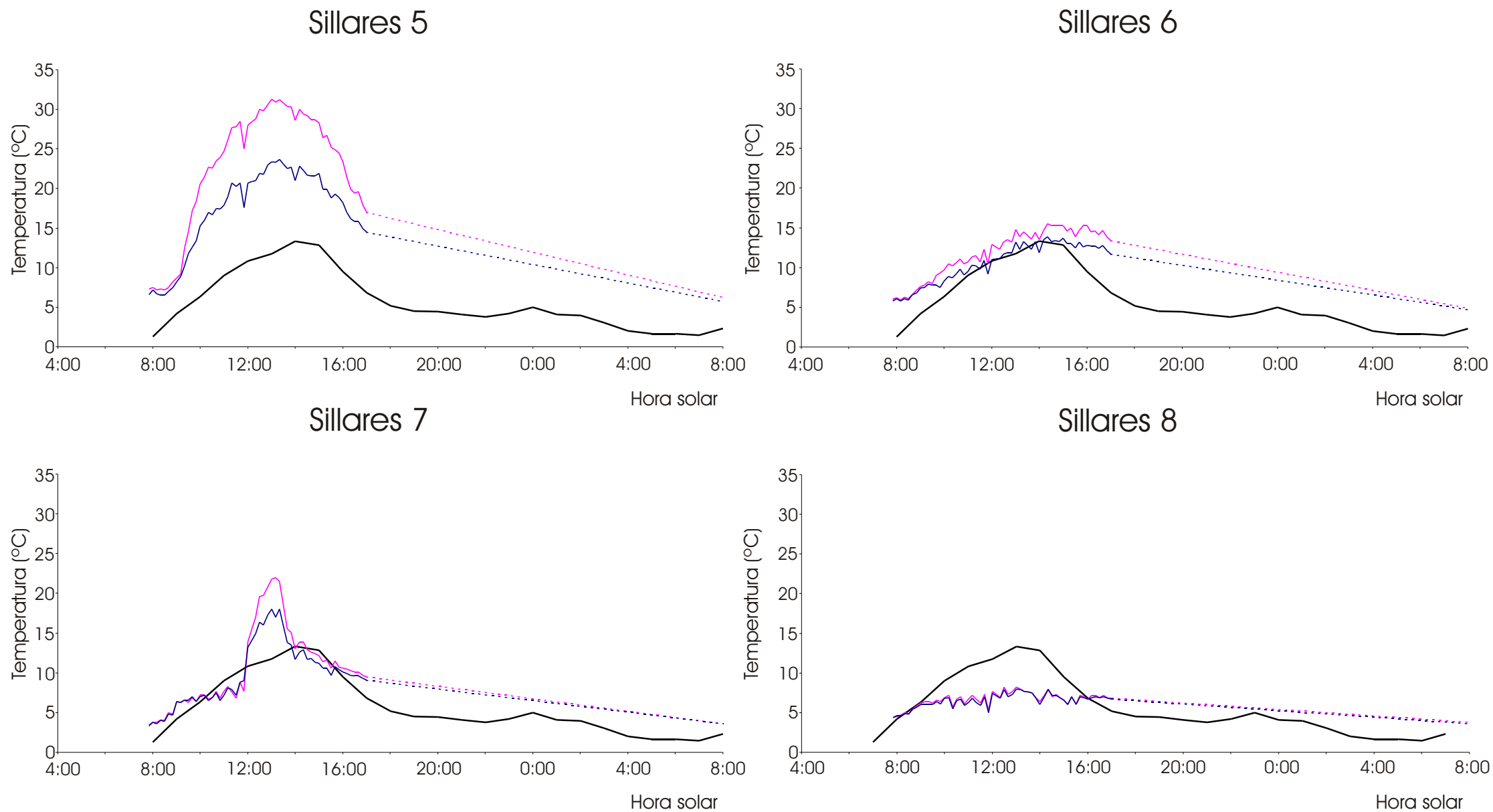
Temperaturas recogidas 24/25 junio 2004



**Figura 9.32 c**



**Figura 9.32 d**



Temperaturas recogidas 26/27 diciembre 2003



### 9.2.2. Regímenes de temperaturas y heladicidad.

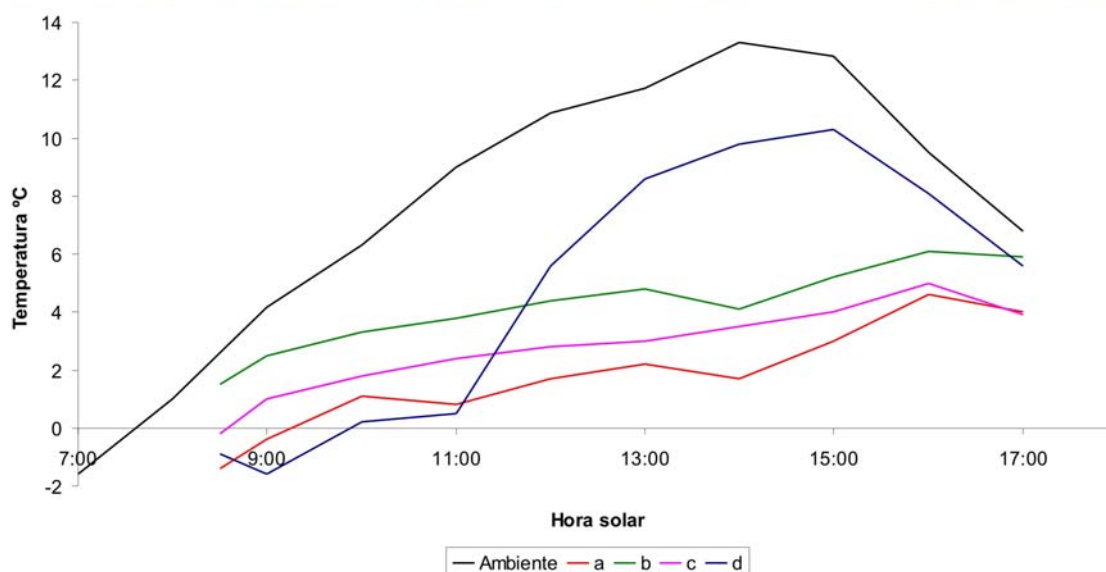
Uno de los ensayos de envejecimiento comúnmente realizado para la evaluación de la durabilidad de los materiales pétreos es el de heladicidad o hielo-deshielo. Este ensayo se basa en la eficacia que la gelifracción tiene como proceso de deterioro de los materiales, dado que al helarse el agua incluida en el sistema poroso de las rocas, se produce un aumento de volumen que, por repetición del proceso, puede conducir a la rotura o disgregación de determinado material pétreo.

Sin embargo, la aplicación de este ensayo se basa en la mayoría de las ocasiones en la constatación de registros de temperaturas ambientales bajo cero en determinada localidad donde se encuentra o se pretende utilizar determinada litología. Como ya se ha visto, el régimen de temperaturas en el interior de un material no tiene un reflejo directo con el régimen de temperaturas ambientales, entendiendo como tal la temperatura del aire. Así, queda por determinar, en climas donde se alcanzan registros de temperatura bajo cero, si los materiales realmente alcanzan estas temperaturas, o si por el contrario, el hecho de que la temperatura de un material insolado alcanza temperaturas superiores a las ambientales puede producir que, aunque la temperatura del aire sea inferior a cero grados y suficiente para la congelación del agua, la temperatura en el material nunca rebase el punto de congelación.

Esto es especialmente importante en climas como el de la ciudad de Madrid, donde son comunes las heladas nocturnas, pero la radiación solar durante el día puede ser lo suficientemente alta para que se alcancen temperaturas decenas de grados mayores que la temperatura ambiental. La escasa conductividad térmica de los materiales pétreos que condiciona una velocidad de transferencia de calor con el ambiente bastante lenta puede hacer suponer que determinado material pétreo nunca alcance temperaturas bajo cero. La principal implicación práctica de este hecho sería la inadecuación de un ensayo de envejecimiento de hielo-deshielo sobre el material, dado que este proceso simplemente no existiría.

Las medidas de temperaturas tomadas en el Panteón de Hombres ilustres durante el invierno (26 de diciembre) correspondieron a un día en el que en la noche anterior se registraron temperaturas de hasta 1,5 °C bajo cero, reflejándose el hecho en la aparición de escarcha en las plantas y pequeñas placas de hielo en los charcos de las calles. La

figura 9.34 recoge la evolución de las temperaturas en diversos puntos de la valla que rodea el Panteón por el lado Sur, en la que se observa un comportamiento disimilar de los materiales con respecto a la existencia de temperaturas bajo cero. La valla se extiende longitudinalmente en dirección Este-Oeste, por lo que los puntos *a*, *b* y *c* están orientados hacia el Norte, mientras que el punto *d* tiene orientación Sur



**Figura 9.34:** Evolución de temperaturas (°C) en la valla del conjunto del Panteón donde se observa la disimilitud en el registro de temperaturas bajo cero (26 diciembre 2003). El punto *a* corresponde a una caliza, mientras que *b*, *c* y *d* corresponden a granito.

Esto se complementa con lo recogido en la tabla 9.11, en la que se muestran los primeros registros de temperatura para cada uno de los sillares de caliza negra estudiados.

De estos datos se extrae que la existencia de temperaturas bajo cero en la superficie (que sería la zona donde más probablemente afectaría una helada) no solo depende del régimen de temperaturas bajo cero en el ambiente, sino que también de la posición del material, y por tanto, del grado de insolación y calentamiento producido por radiación en ciclos anteriores (es decir, por ejemplo, en el día anterior a la noche de helada). Mientras que algunos de los puntos en la valla, que presentan en general un pobre soleamiento debido a la incidencia de la radiación con muy bajo ángulo para esta fecha, alcanzan temperaturas bajo cero y las mantienen aun cuando la temperatura ambiente ha superado este límite, los materiales situados en las fachadas, que recibieron el día anterior mayor radiación y por tanto se calentaron más, presentan unas temperaturas de superficie que exceden ampliamente el punto de congelación del agua.

**Tabla 9.11:** Temperaturas (°C) recogidas en la caliza negra en los distintos puntos de medida en la primera medida de la mañana (26 diciembre 2003, hora solar).

	1	2	3	4	5	6	7	8
7:50	5,8	7,5	6,8	6,5	7,3	6,0	3,3	4,0

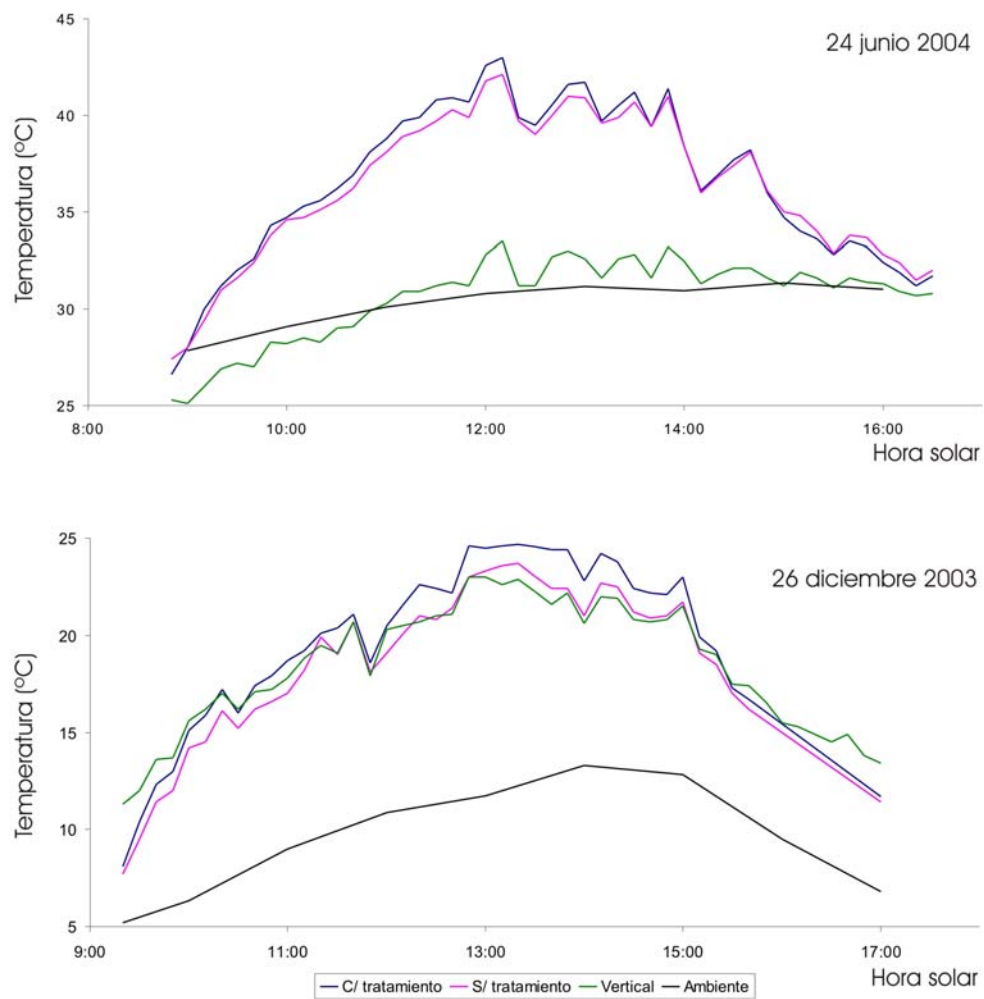
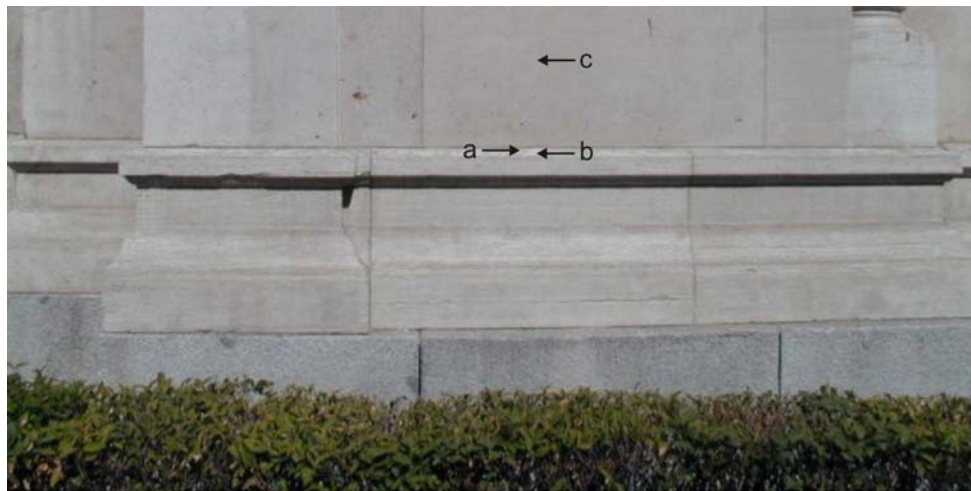
De aquí se concluye que, especialmente en climas donde los regímenes de temperaturas ambientales bajo cero son moderados, a la hora de estudiar la existencia de procesos de hielo-deshielo en los materiales pétreos o de evaluar su efectividad por medio de ensayos de laboratorio, conviene tener en cuenta el régimen de temperaturas del material antes que el régimen de temperaturas ambientales. De lo contrario se podría estar evaluando un agente de deterioro que, de hecho, pudiera no tener un reflejo en el seno del material.

### 9.2.3. Evolución térmica y deterioro de tratamientos de protección.

En una de las restauraciones del Panteón de Hombres Ilustres se aplicó un tratamiento protector en su superficie. El tratamiento generó una variación de las propiedades térmicas de superficie del material tratado. Las propiedades térmicas del tratamiento de protección difieren de las del sustrato. Además, en este caso, la penetración del tratamiento fue muy baja y forma una espesa película que varía



notablemente las propiedades visuales del material, entre las cuales se encuentra el color (ver tabla 9.8), y por tanto el albedo y la absorción de radiación incidente.



**Figura 9.35:** Evolución de temperaturas de la caliza blanca (punto 4) en una moldura tratada (a) y sin tratar (b) y en una superficie tratada vertical (c).

La figura 9.35 recoge la evolución de temperaturas durante los dos periodos de muestreo en la que se observan las diferencias de temperaturas alcanzadas entre la caliza tratada y sin tratar que llegan hasta 2 °C. Esta figura muestra también muy claramente las diferencias de temperatura que se pueden llegar a alcanzar debido a la posición horizontal o vertical de un mismo material y por tanto el ángulo con el que la radiación solar. Estas diferencias son más notables en verano, cuando los rayos solares inciden con muy bajo ángulo sobre las fachadas verticales, mientras que en las más horizontales llega a incidir casi perpendicularmente.

En el Panteón se observa una relación directa entre el deterioro del tratamiento de protección (en forma de pérdidas de recubrimiento) y el régimen de temperaturas al que se ve sometido. Así, las molduras con orientación Sur, que reciben mayor soleamiento, presentan pérdidas del tratamiento de protección que no se observan en otras orientaciones. La figura 9.36 ilustra esta tendencia en la que se observa una relación entre las zonas donde se recibe mayor cantidad de radiación en las horas centrales del día, con respecto a otras orientaciones menos insoladas.



**Figura 9.36:** Deterioro diferencial del tratamiento de protección (que oscurece el substrato calizo) con respecto a la orientación. La fachadas orientadas al Sur (derecha e izquierda de la imagen) presentan pérdidas del tratamiento, mientras que en la fachada orientada al Oeste (en el centro de la imagen, en la zona de sombra) el tratamiento se preserva.

#### 9.2.4. Evolución espacial de las temperaturas.

Para estudiar como evoluciona temporalmente la temperatura de la superficie de un sillar con la insolación, así como para aproximarse a lo que sería el perfil de temperaturas con la profundidad, se realizó de manera análoga al Pabellón Central del CSIC un mapa de distribuciones de temperaturas que incluía todo el periodo en el que un sillar recibe insolación. Los datos obtenidos se recogen en la figura 9.37, que por su extensión se sitúa al final del presente apartado.

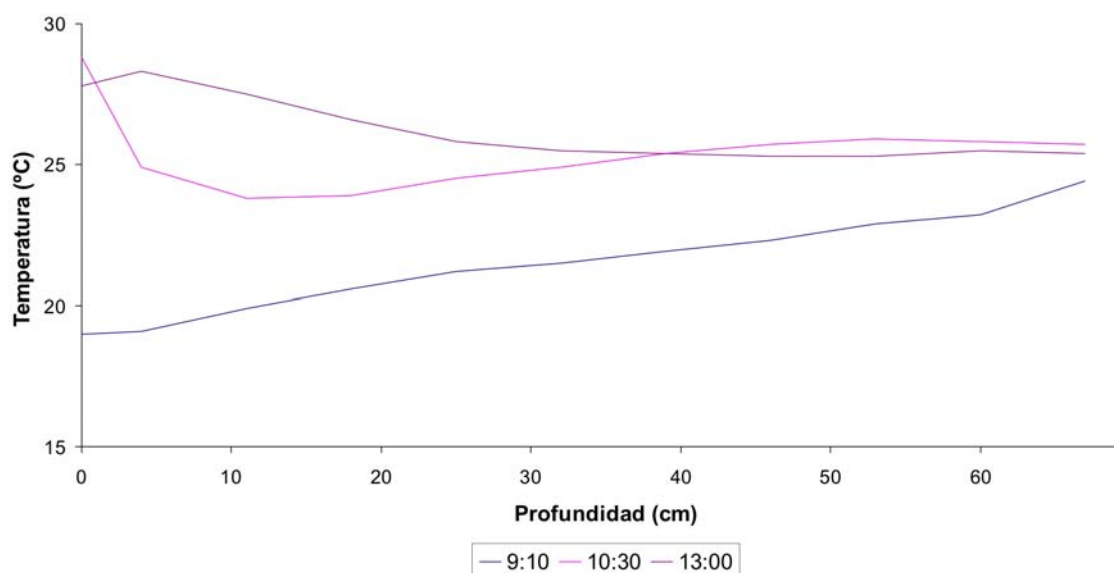
La situación inicial del frente del sillar muestra un ligero gradiente de temperaturas, posiblemente en parte herencia del régimen de calentamiento del ciclo diario anterior. La existencia de una arista en la parte derecha del sillar, es un factor que también condiciona menores temperaturas en esa zona, debido a que la transferencia de calor hacia el aire es mayor. En la cara lateral, se observa que las temperaturas en la zona más lejana de la cara frontal del sillar son mayores que en la zona más cercana. La cara frontal del sillar, que esta orientada al Este, es la única que recibe insolación, mientras que la cara lateral, orientada al Norte, no la recibe. Así se puede considerar que la distribución de temperaturas en la cara lateral se asemejaría a un perfil de temperaturas obtenido en el interior del material. De tal forma, el gradiente de temperaturas que se observa en el lateral correspondería a la pérdida de calor progresiva durante la noche por la cara frontal para equilibrarse con la temperatura ambiental, generándose una situación de desequilibrio con las zonas más internas del material que mantienen el calor debido a la insolación del día anterior.

En el periodo comprendido desde las 9:20 a las 10:10 (horas locales; 7:20 a 8:10 hora solar) que recogen las figuras de la 9.37a a la 9.37d, se recoge una distribución de temperaturas compleja en superficie debido a que estas primeras insolaciones están condicionadas por la presencia de cubierta vegetal, con lo que la insolación se muestra como un juego de luces y sombras complejas en la superficie. En perfil, comienza la transferencia de calor desde las zonas más externas a las zonas más internas comenzándose a generar un gradiente de temperatura con la superficie más cálida que el interior.

A las 10:10 (figura 9:37d) se produce la desaparición de la última sombra hacia la esquina inferior izquierda de la superficie, comenzando a uniformarse la temperatura

superficial en una tendencia que continúa hasta las 11:30 (figura 9.37h) en que el frente del sillar comienza a recibir sombra por la parte de la izquierda. En la figura 9.38, se muestran una serie de perfiles de temperaturas obtenidos a partir de las temperaturas en la línea media de la cara que no recibe insolación. Estos perfiles se relacionarían con la distribución de temperaturas en el interior del material, debido a que al recibir insolación solo por la cara frontal, podemos considerar que los fenómenos de transferencia de calor de la cara lateral van a ser despreciables con respecto a los de la cara frontal. La situación podría corresponderse a los perfiles obtenidos en el capítulo 6 en los cuales la radiación se recibe por una cara, estando el resto aislada.

Así, la figura 9.38 recoge los perfiles se muestran los perfiles característicos del principio, del inicio y del final del ciclo de insolación. En el perfil se comienza a generar un fuerte gradiente en la superficie del sillar, descendiendo las temperaturas hacia la zona media, para volver a aumentar en zonas más profundas, siguiendo la pauta de onda atenuada exponencialmente, característica del calentamiento cíclico de los sólidos.



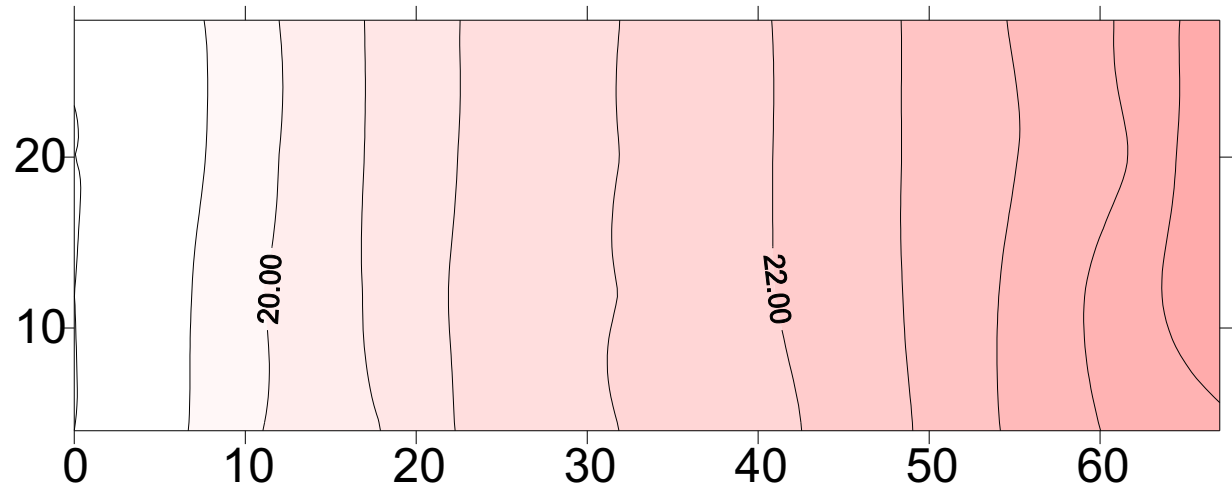
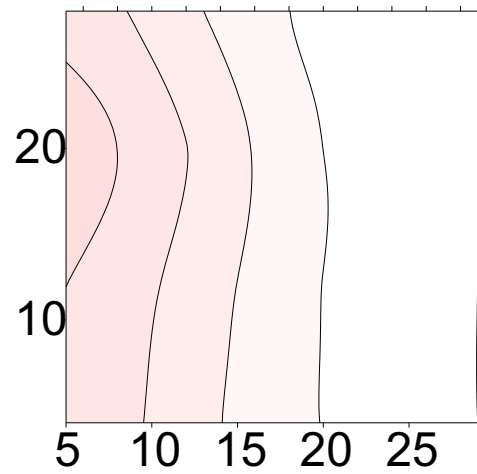
**Figura 9.38:** Distribución de temperaturas obtenidas en el perfil longitudinal del sillar mapeado donde se observa que la temperatura en la zona más lejana a la cara frontal un valor casi constante en comparación con el resto de la distribución, que comienza con un exterior más frío que el interior (9:10), para continuar con un calentamiento de forma seno-exponencial (10:30) en una tendencia que se invierte al cesar la insolación en el sillar (13:00).

A partir de las 11:30, la sombra de forma lineal y vertical, progresa hacia la derecha hasta las 12:30 (figura 9.37k) cuando todo el sillar se encuentra en sombra. A partir de ese momento la temperatura, tanto superficial como en el perfil comienza a homogeneizarse otra vez aunque, más exageradamente en el caso del perfil no se llega al equilibrio térmico.

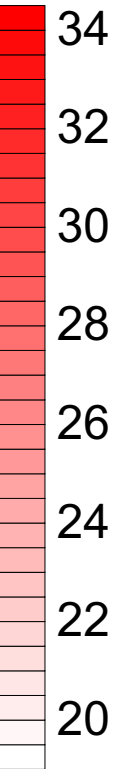
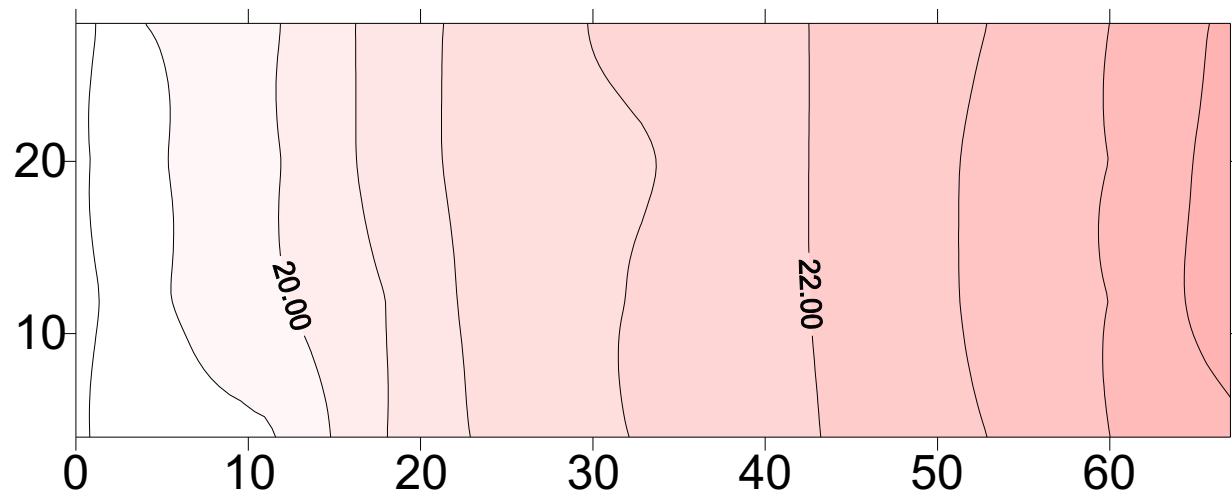
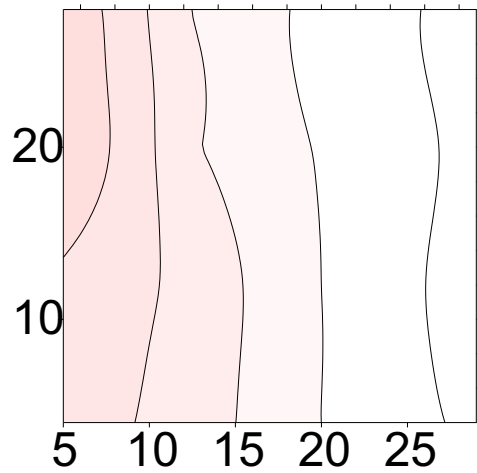
Esta evolución muestra la heterogeneidad de las distribuciones de temperatura en un material homogéneo tanto en superficie como en perfil, más allá de las diferencias composicionales que se estudiaron en el caso anterior del granito con enclaves. Las heterogeneidades del material, la posición de los sillares, la existencia de diferentes caras con diferentes regímenes de calentamiento diferentes debido a sus orientaciones, la coexistencia de caras horizontales y verticales (como se vio en el caso de las molduras o de la valla), el diseño del edificio y su entorno, condicionan la complejidad del fenómeno del calentamiento de los materiales pétreos y la multitud de variables que tienen una influencia real o potencial en los procesos de deterioro de los edificios.

# Figura 9.37 a

9:10

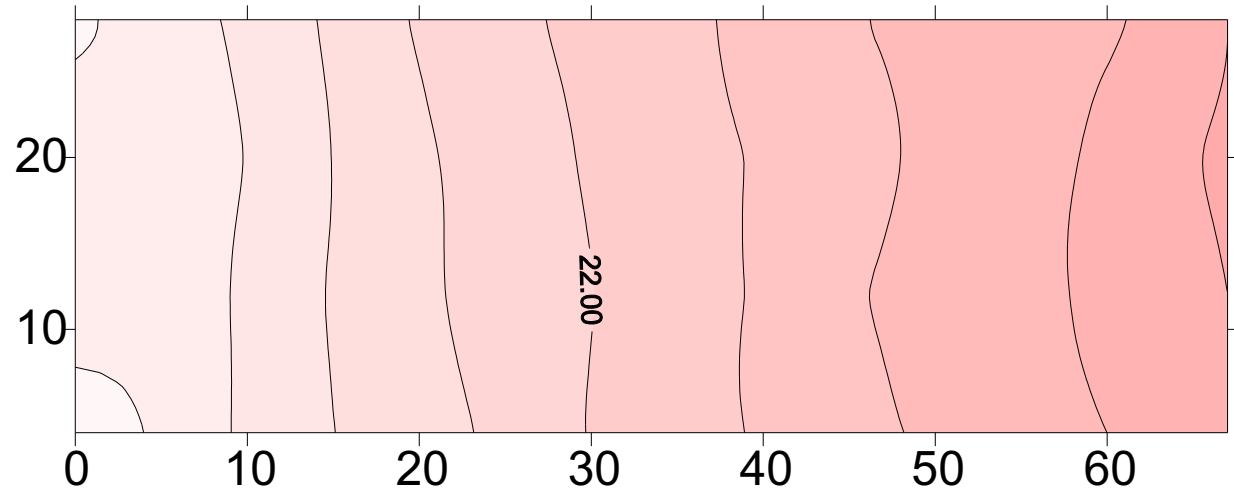
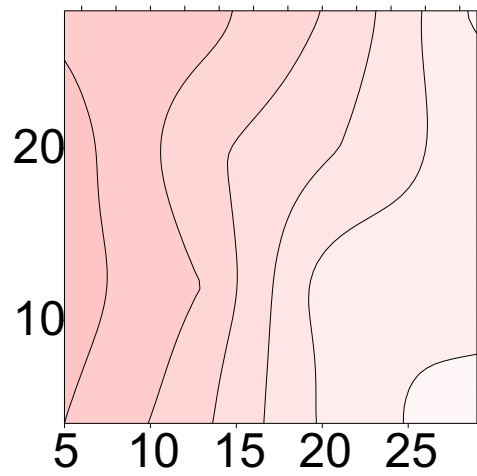


9:20

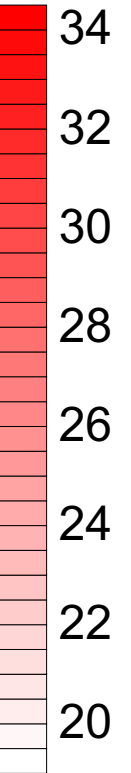
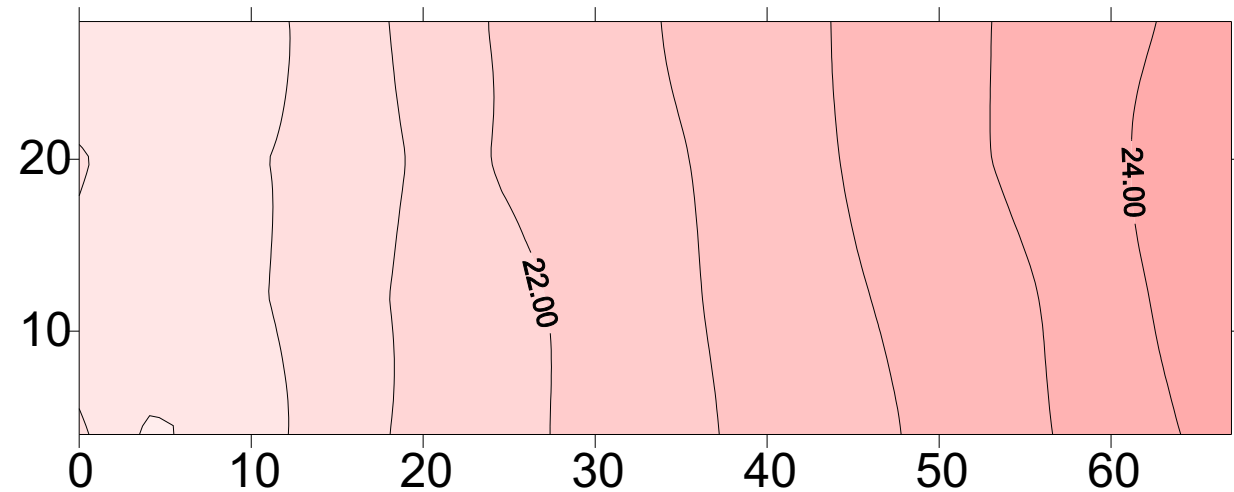
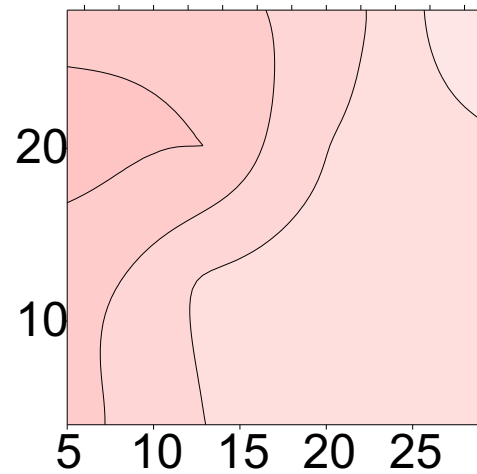


# Figura 9.37 b

9:30

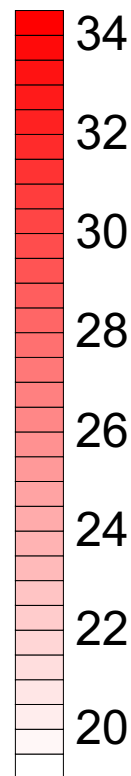
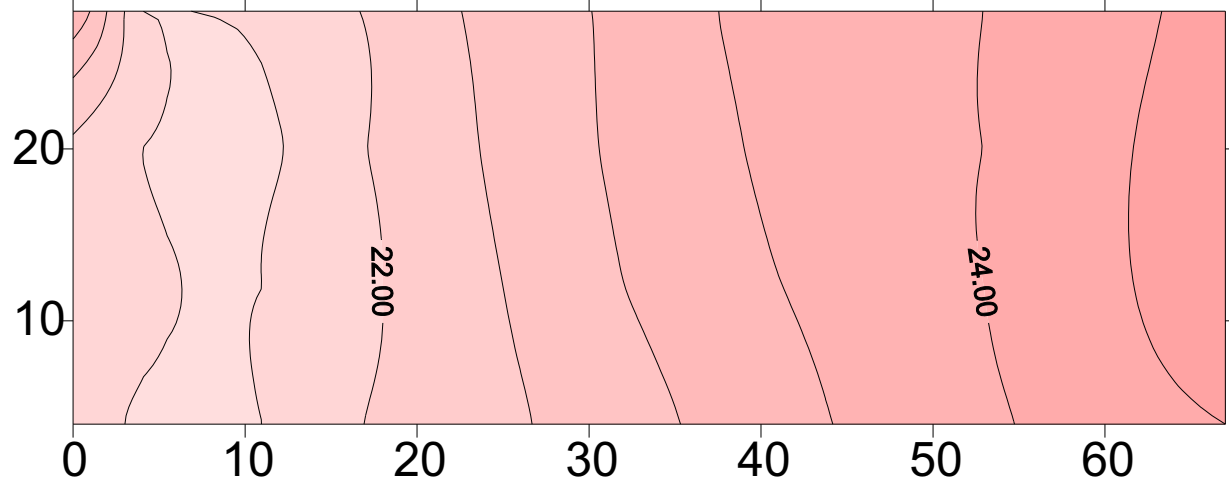
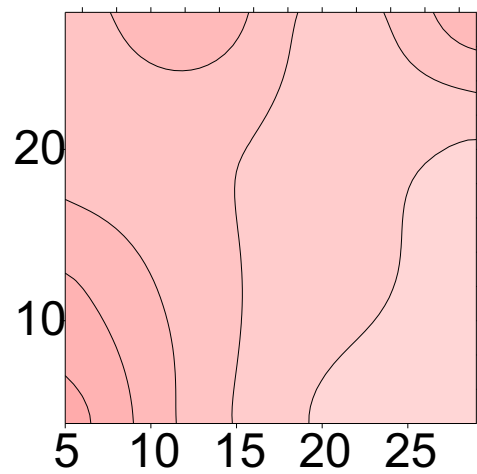


9:40

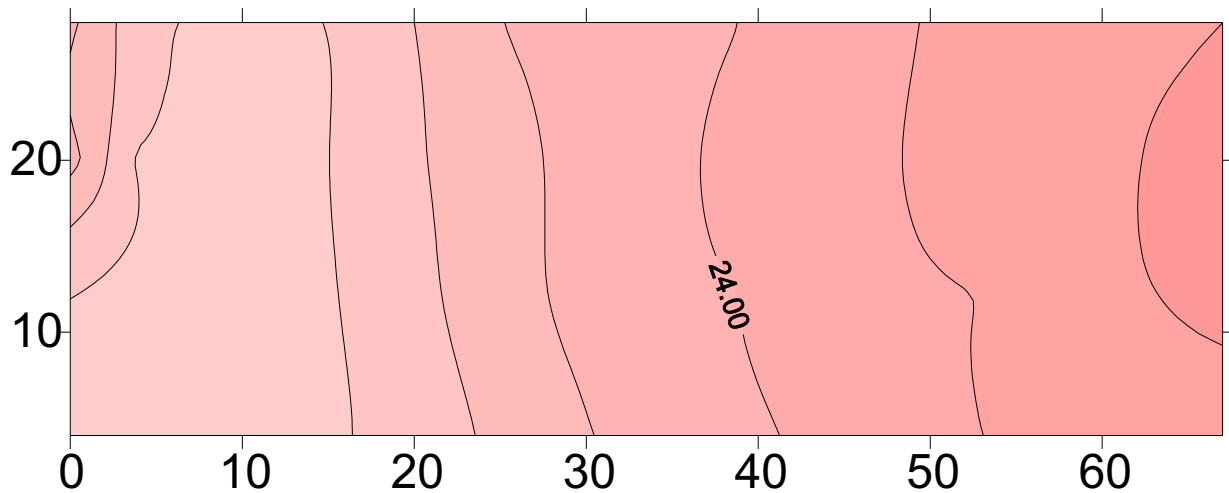
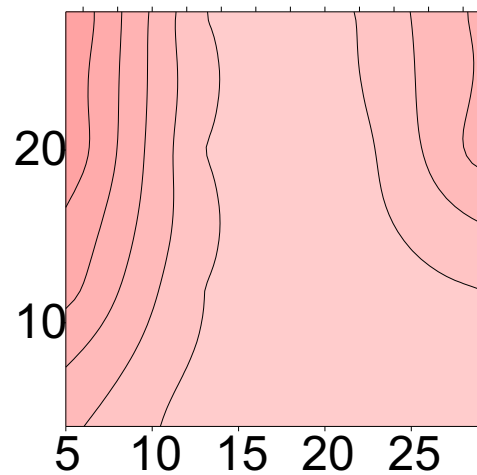


# Figura 9.37 c

9:50



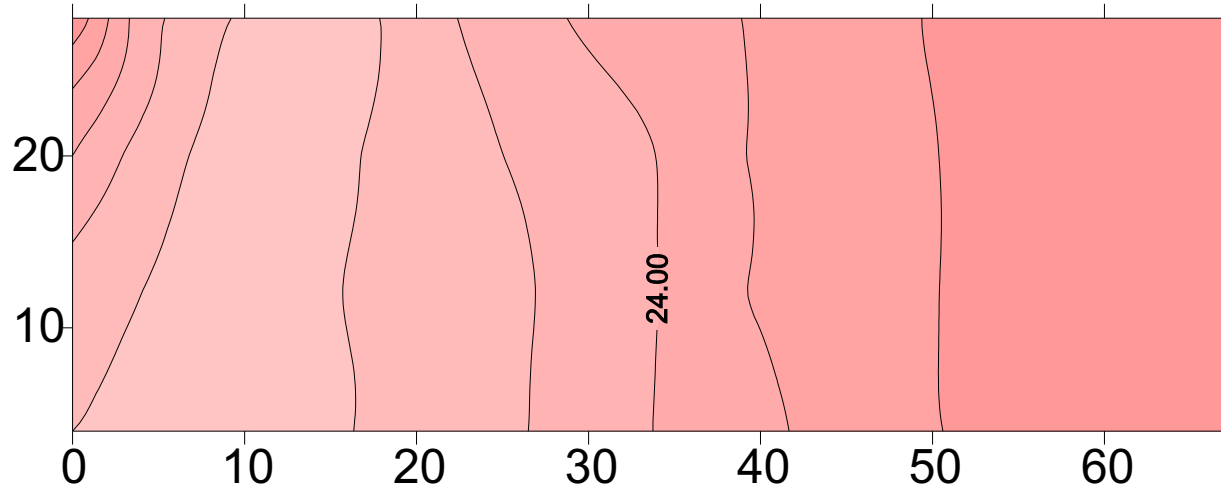
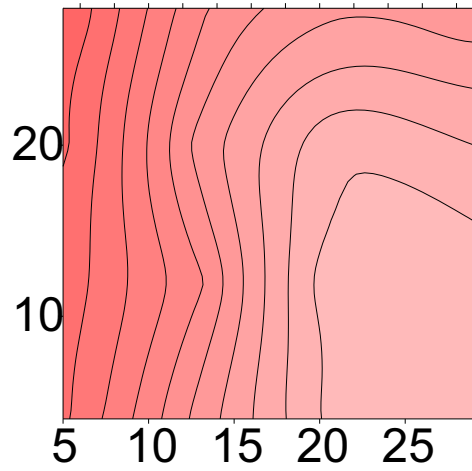
10:00



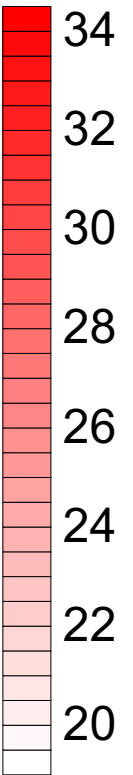
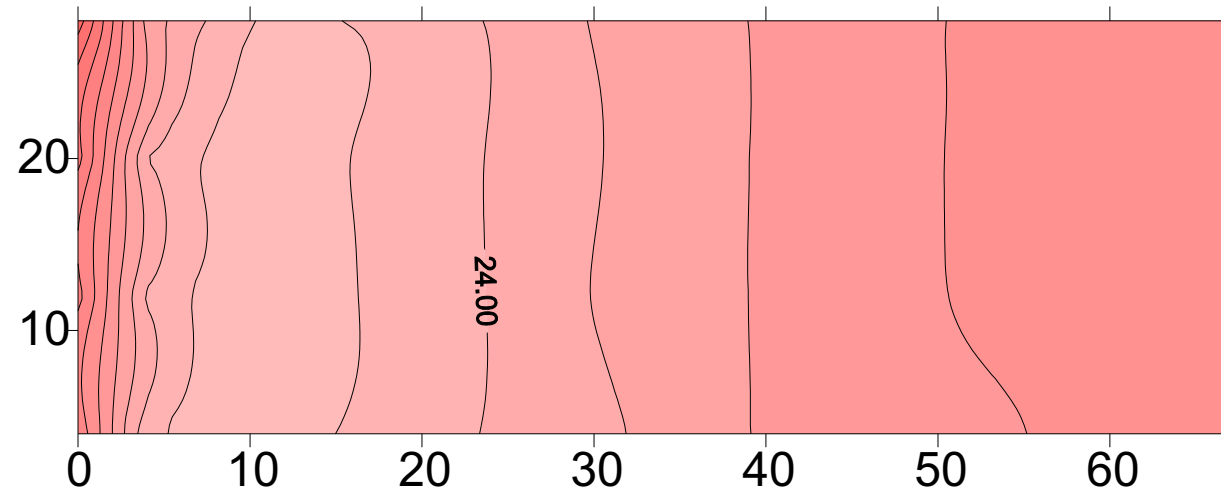
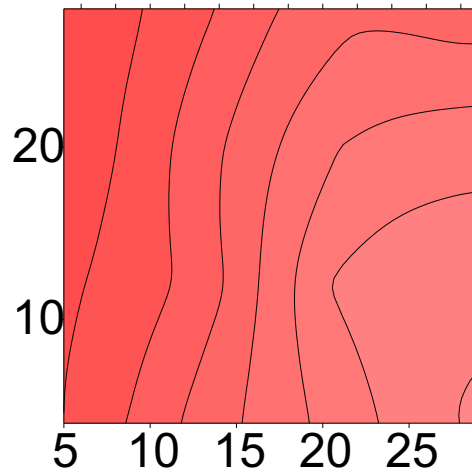


**Figura 9.37 d**

10:10

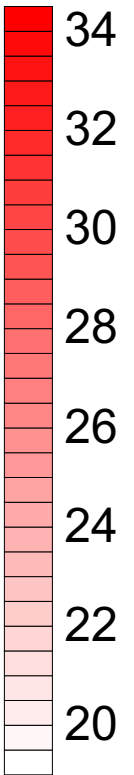
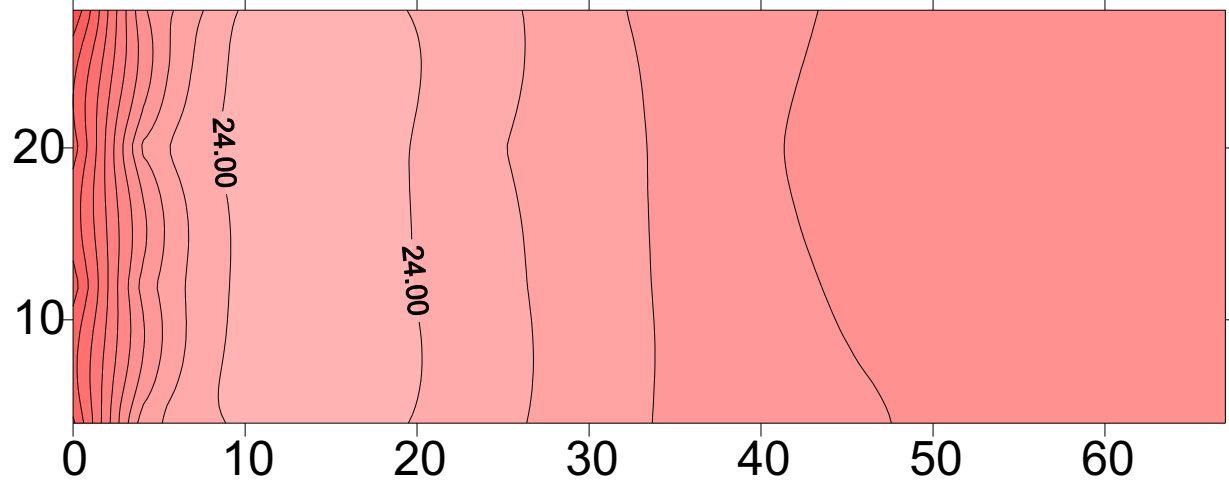
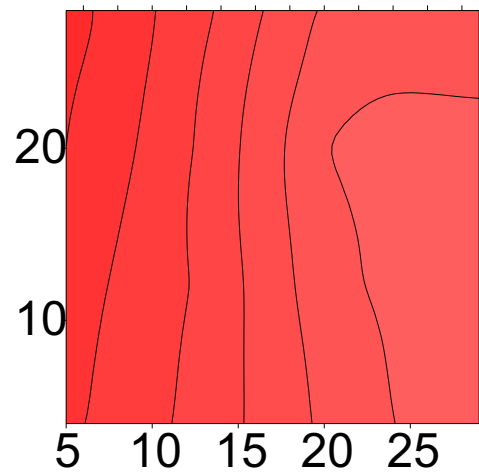


10:20

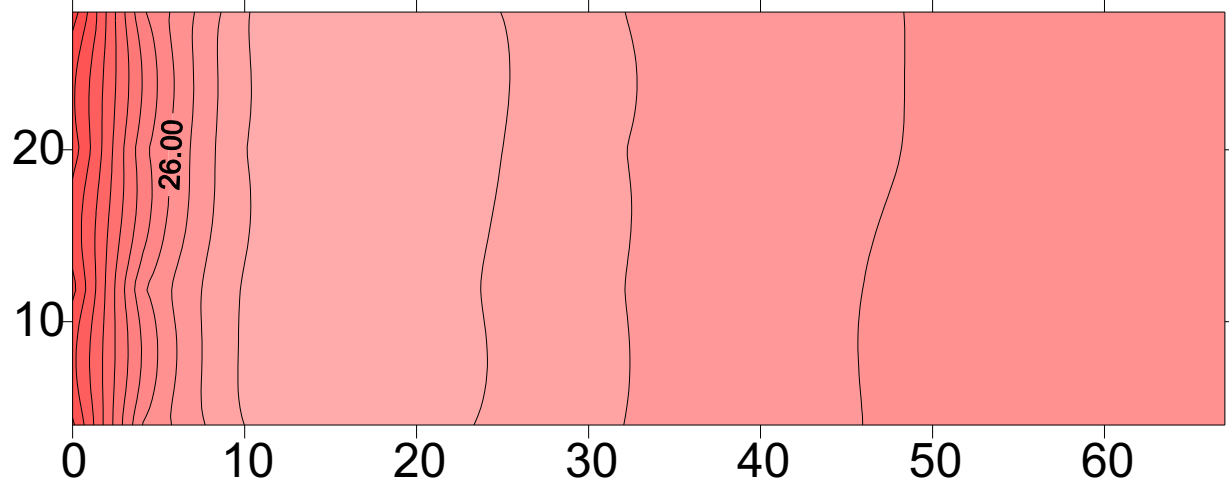
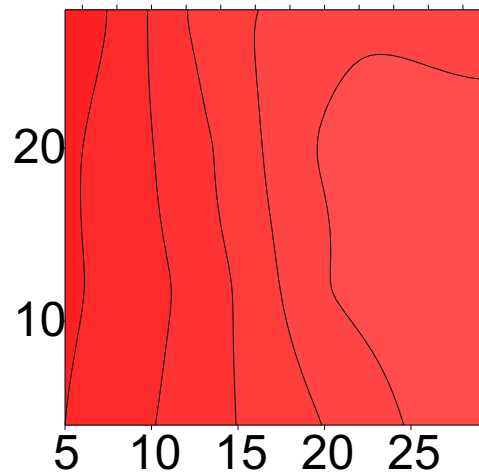


**Figura 9.37 e**

10:30

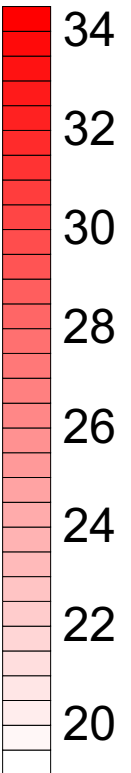
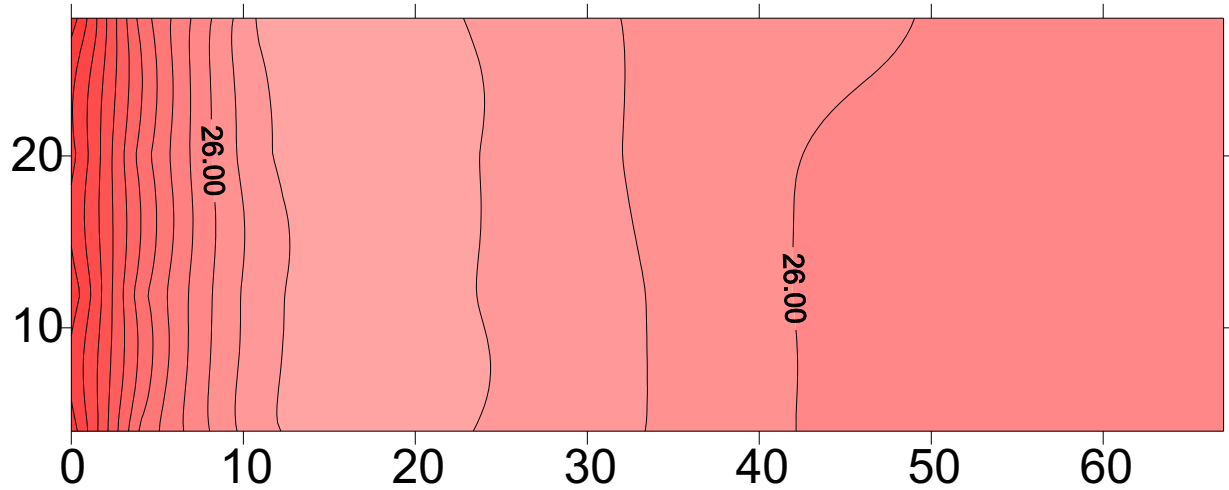
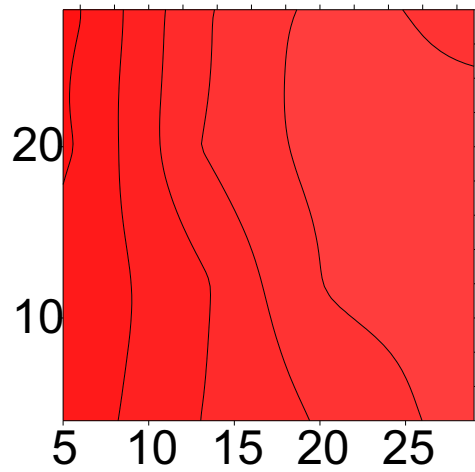


10:40

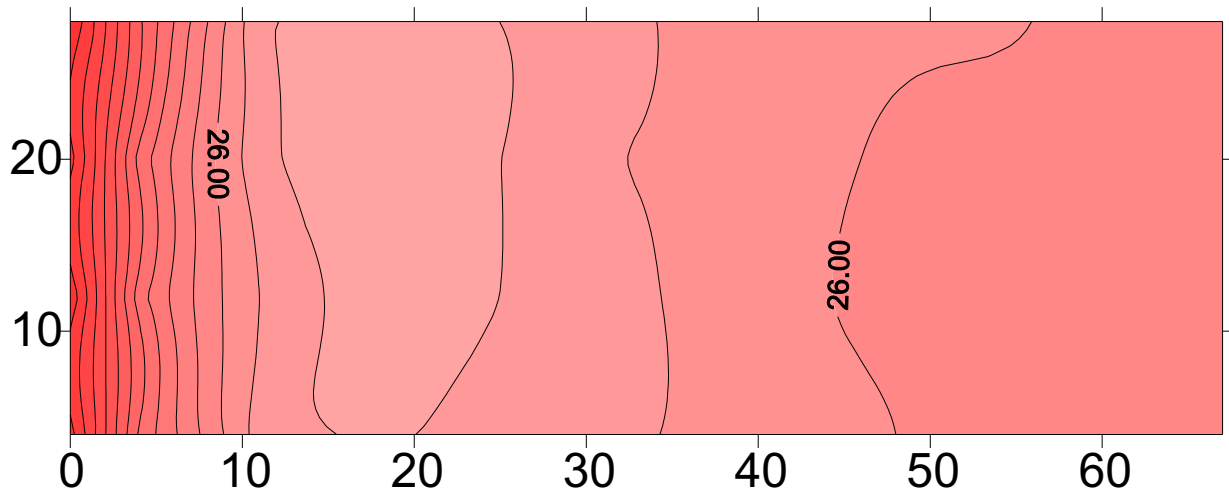
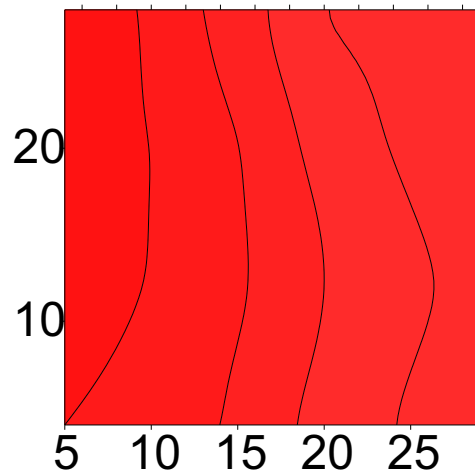


**Figura 9.37 f**

10:50

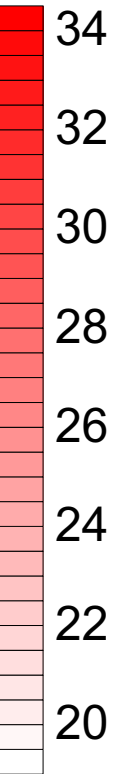
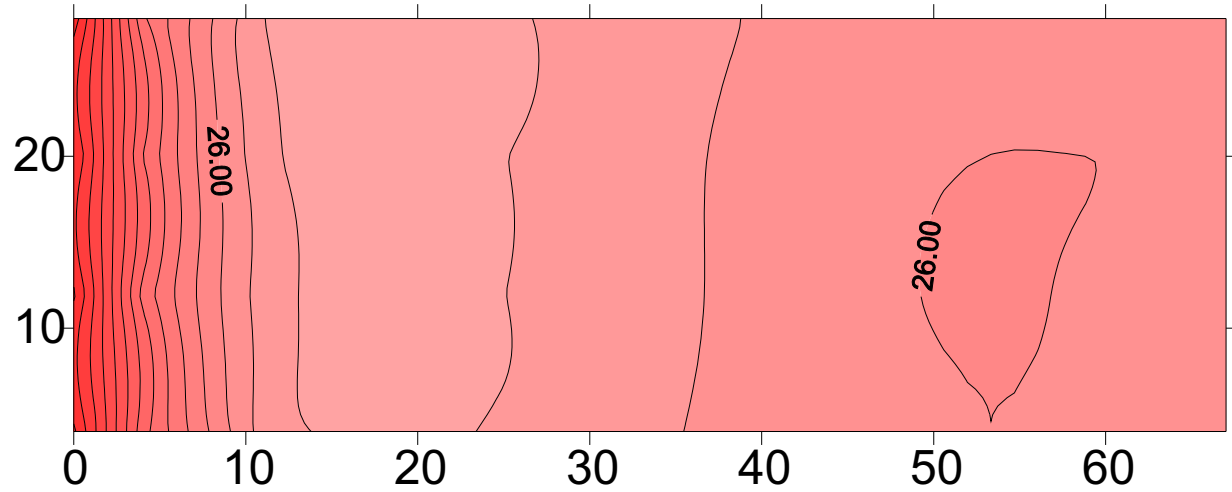
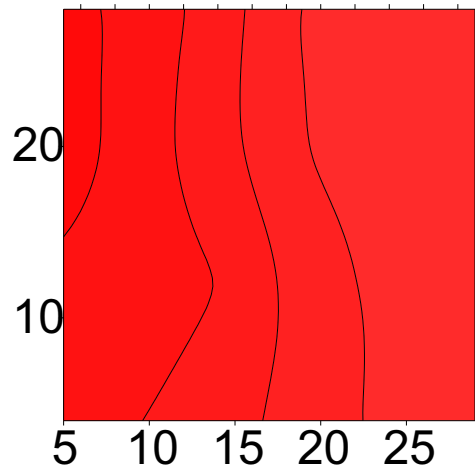


11:00

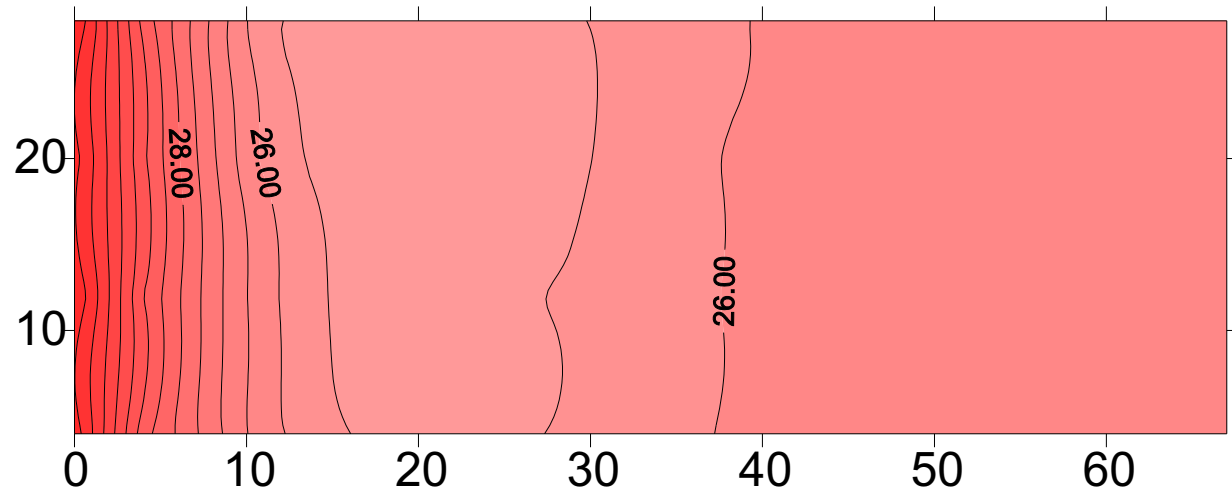
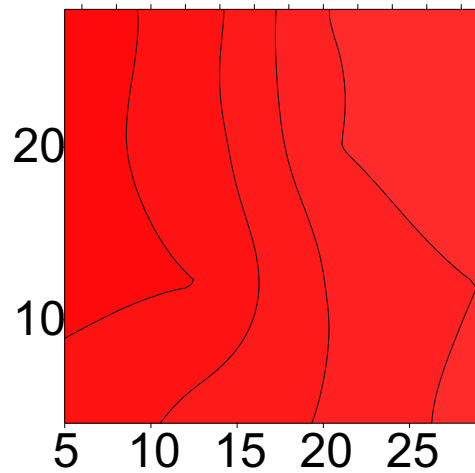


# Figura 9.37 g

11:10

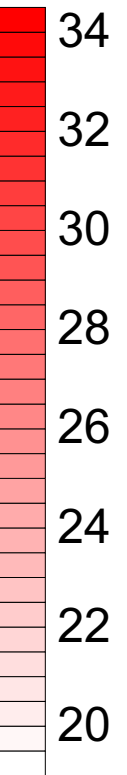
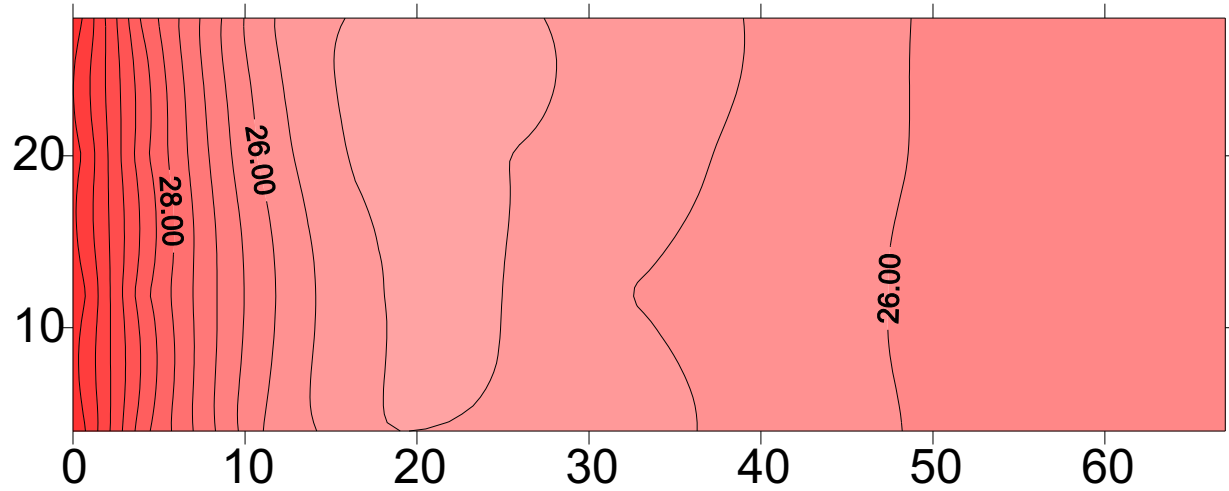
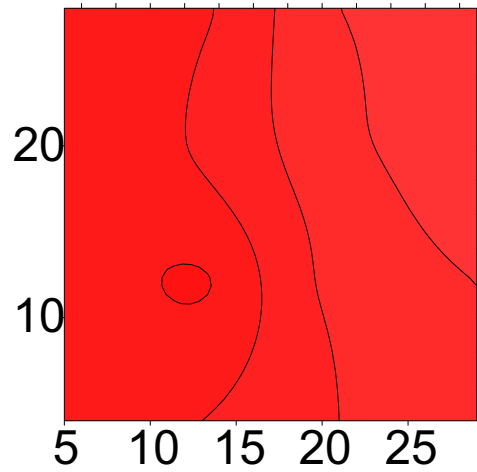


11:20

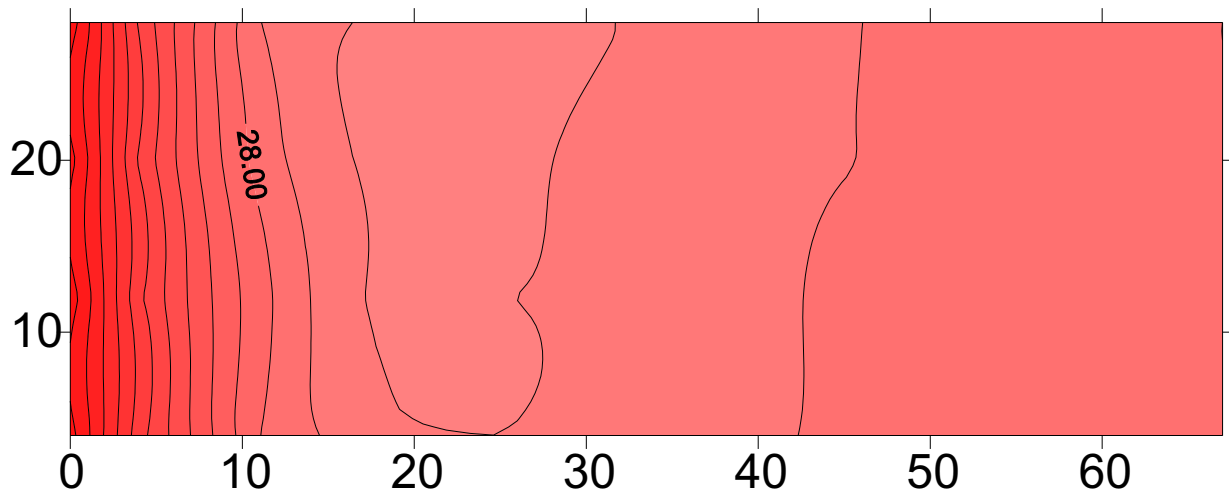
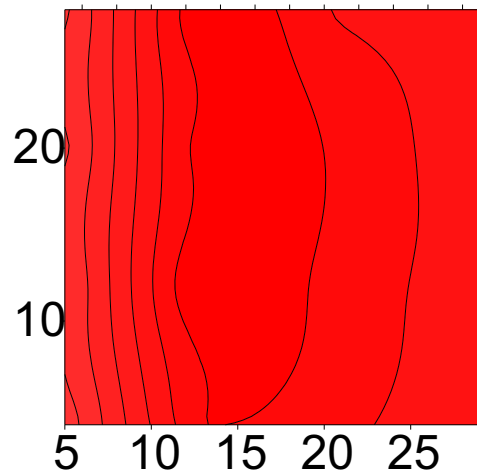


**Figura 9.37 h**

11:30

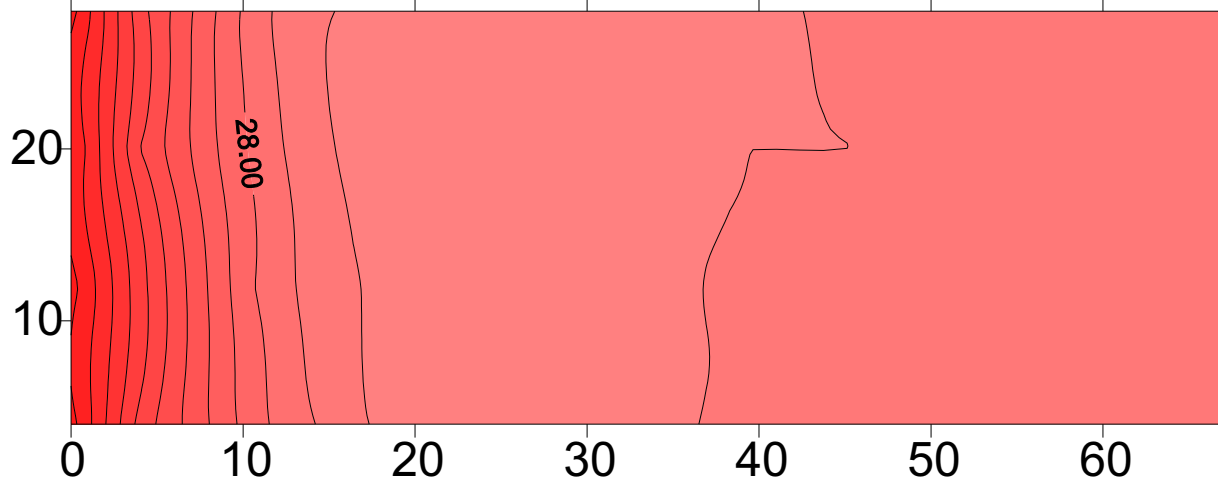
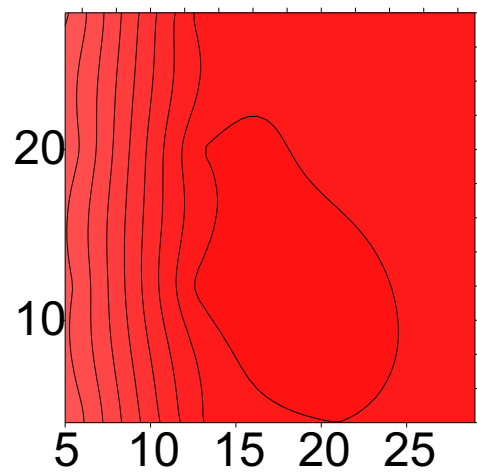


11:40

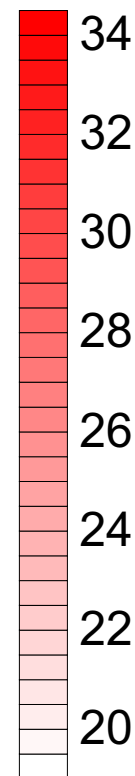
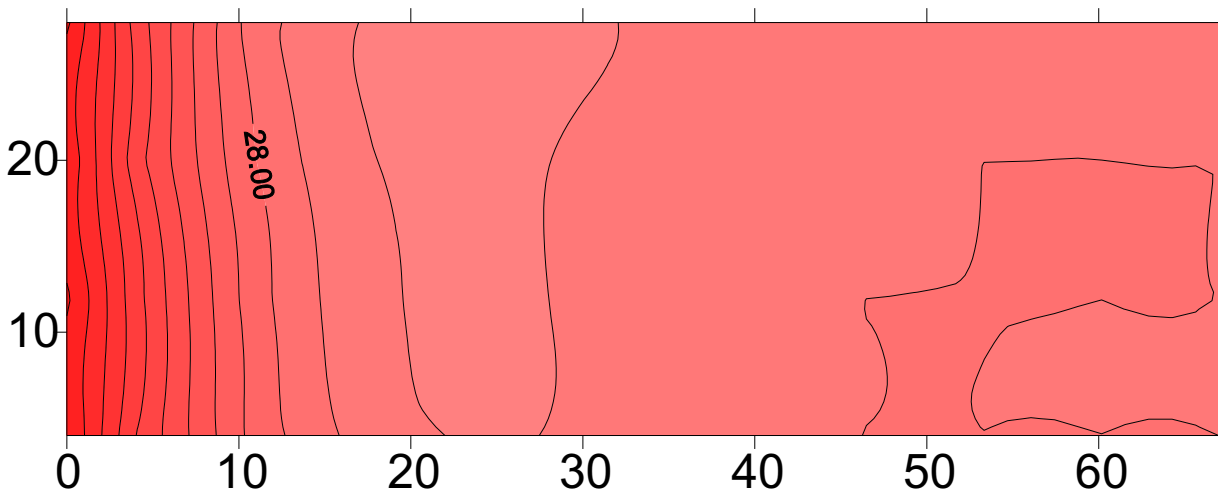
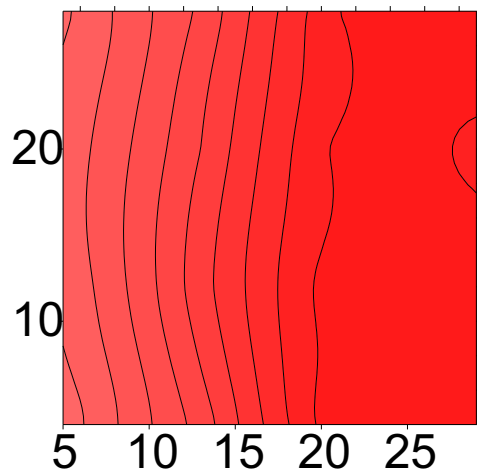


# Figura 9.37 i

11:50

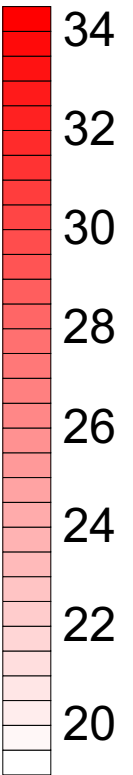
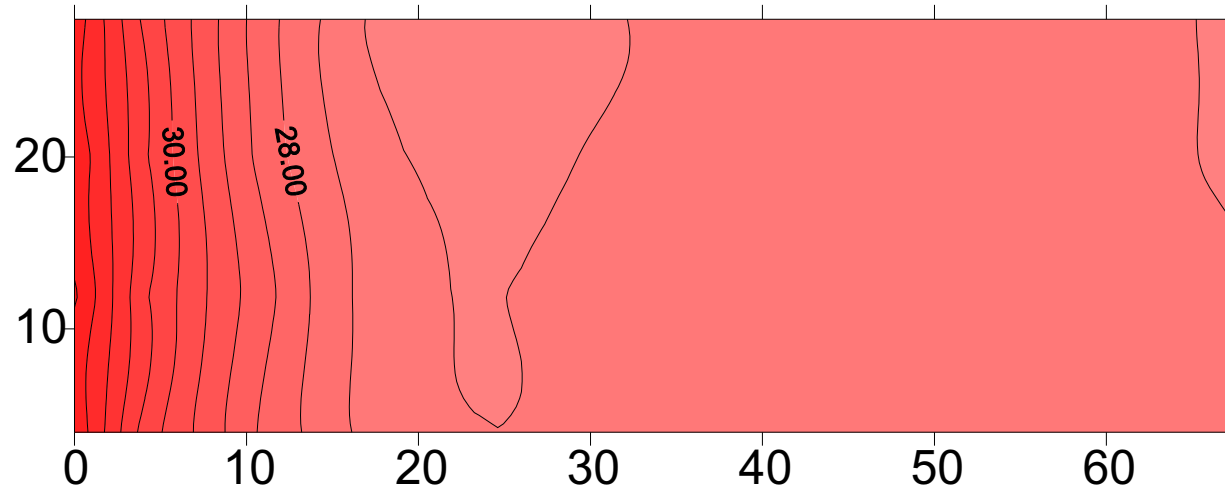
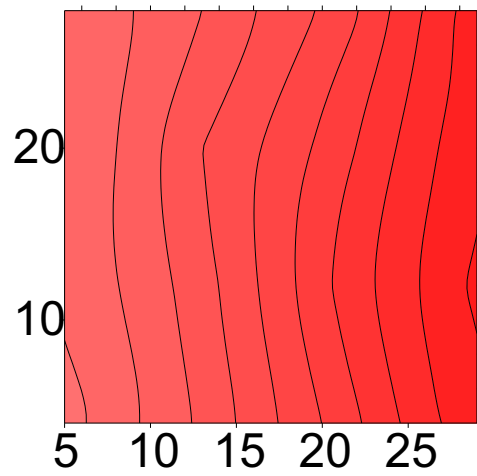


12:00

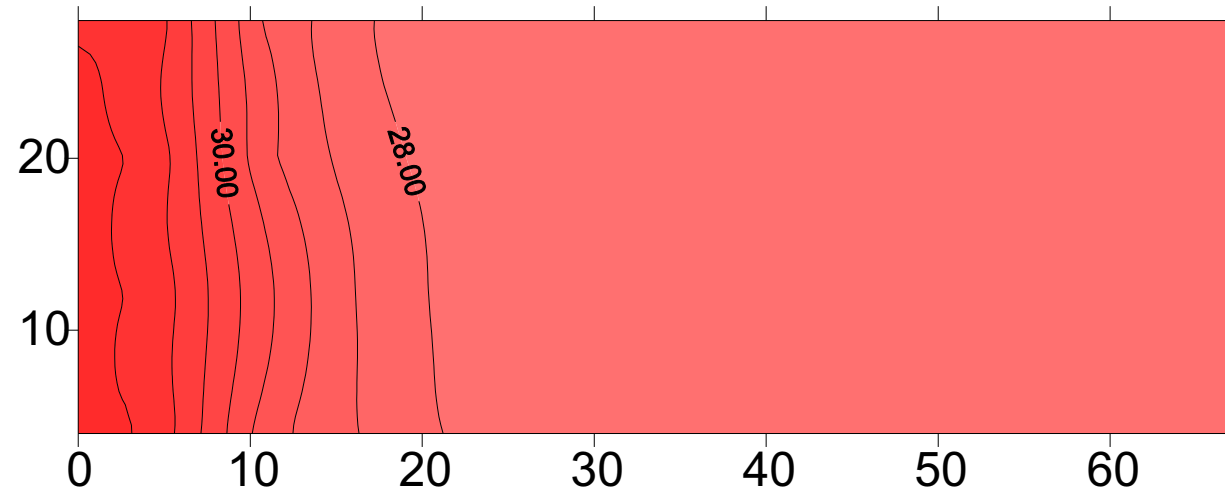
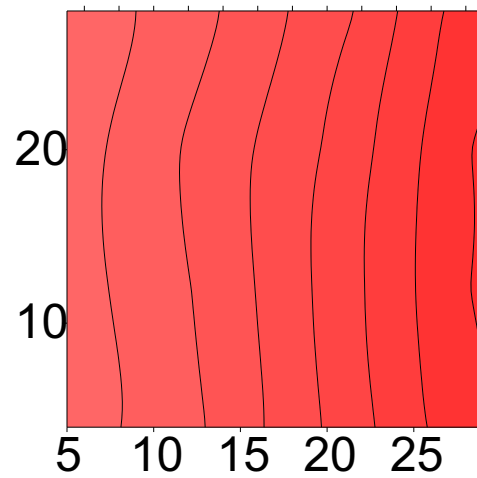


**Figura 9.37 j**

12:10

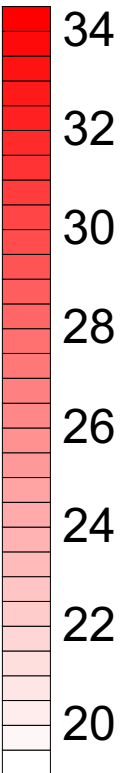
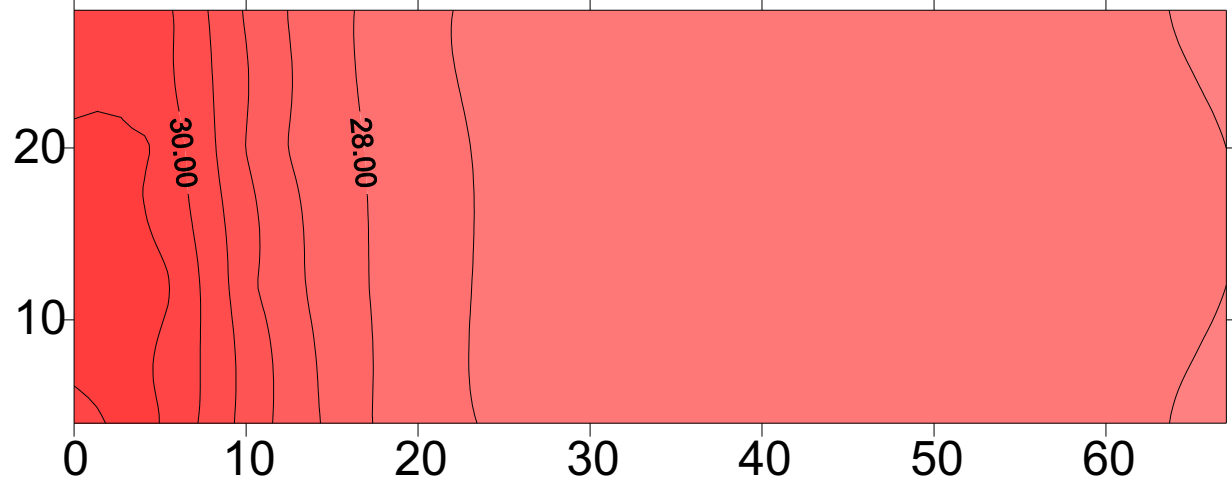
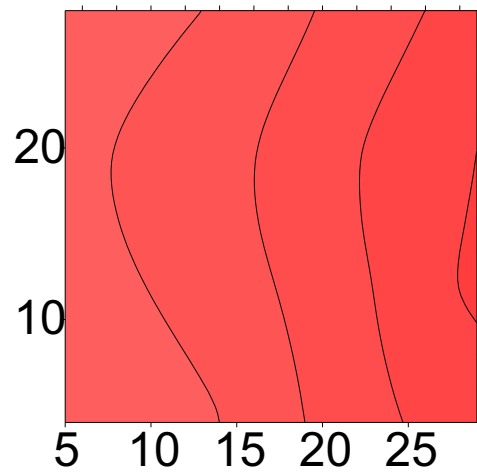


12:20

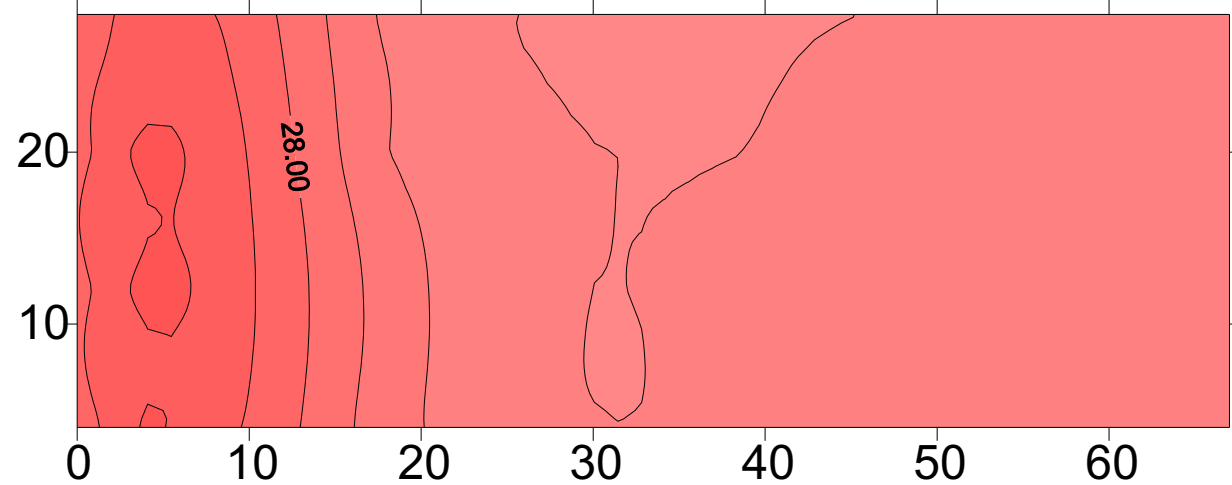
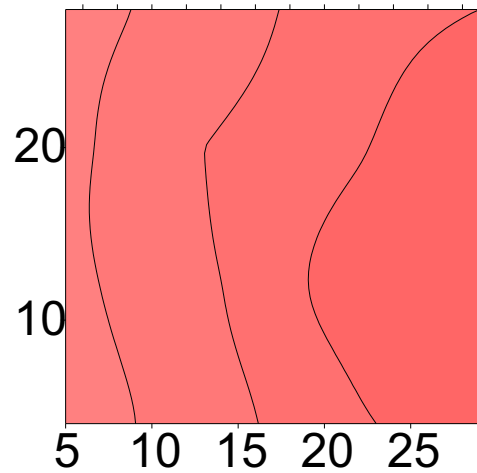


# Figura 9.37 k

12:30



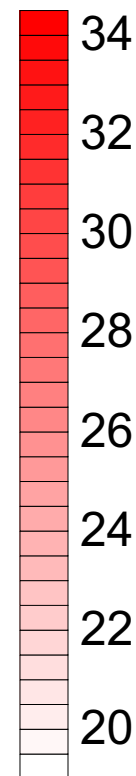
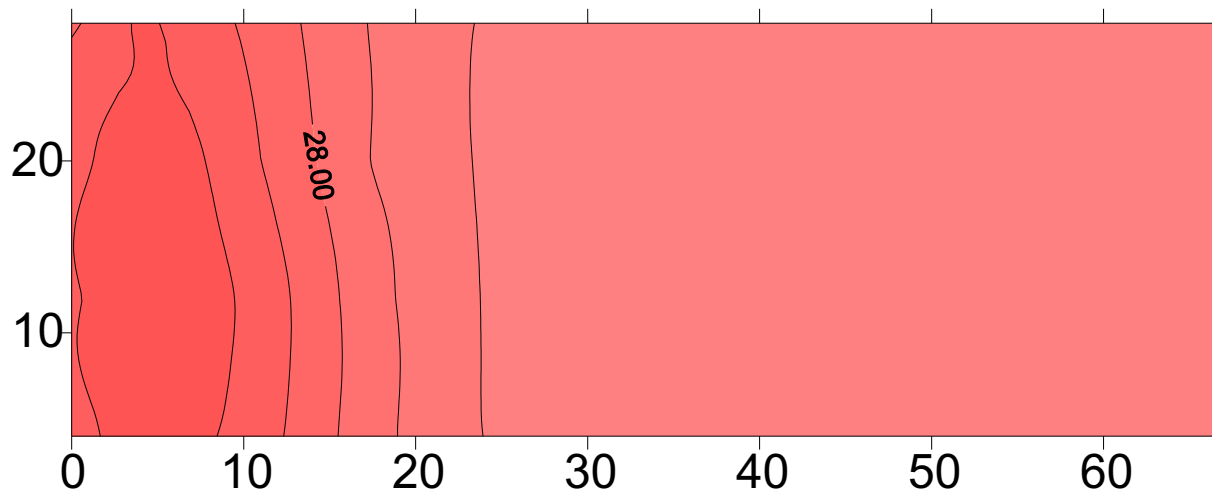
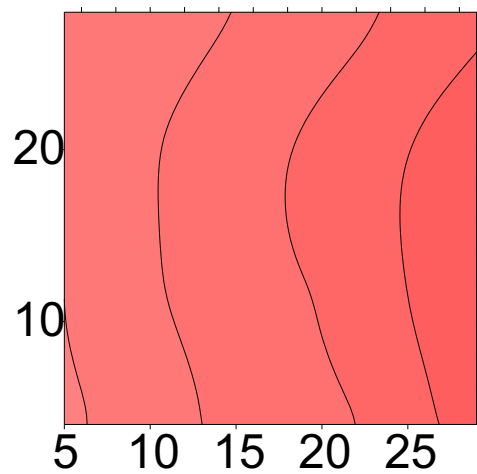
12:40



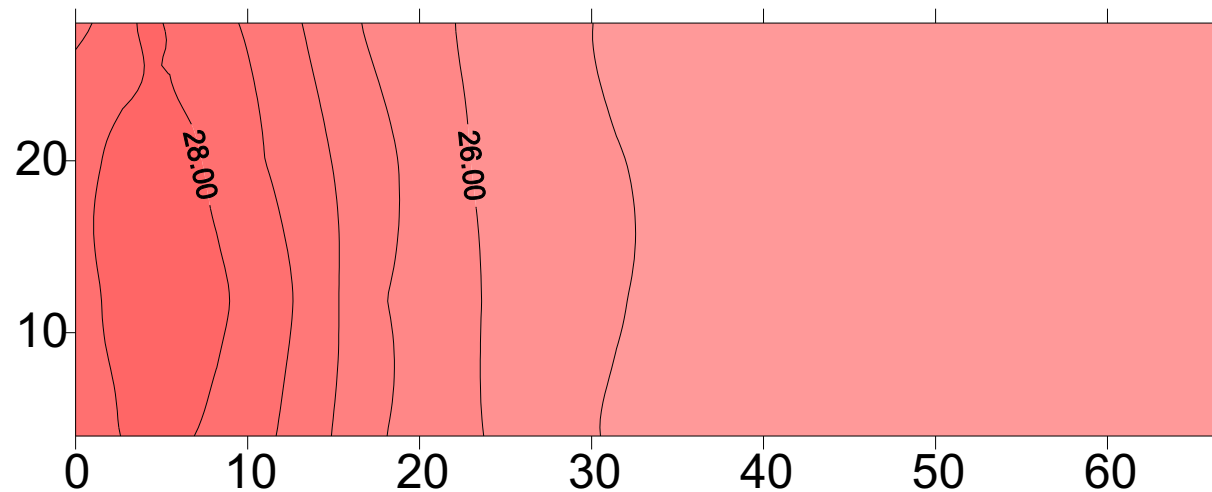
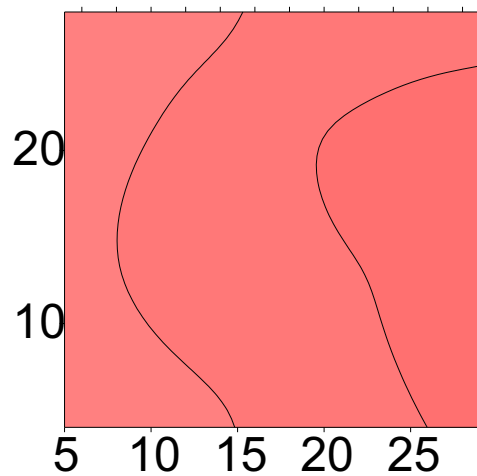


# Figura 9.37 I

12:50

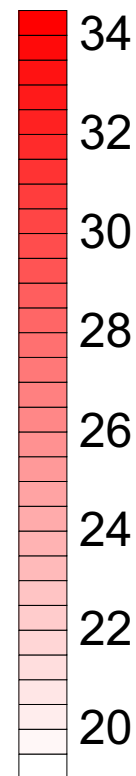
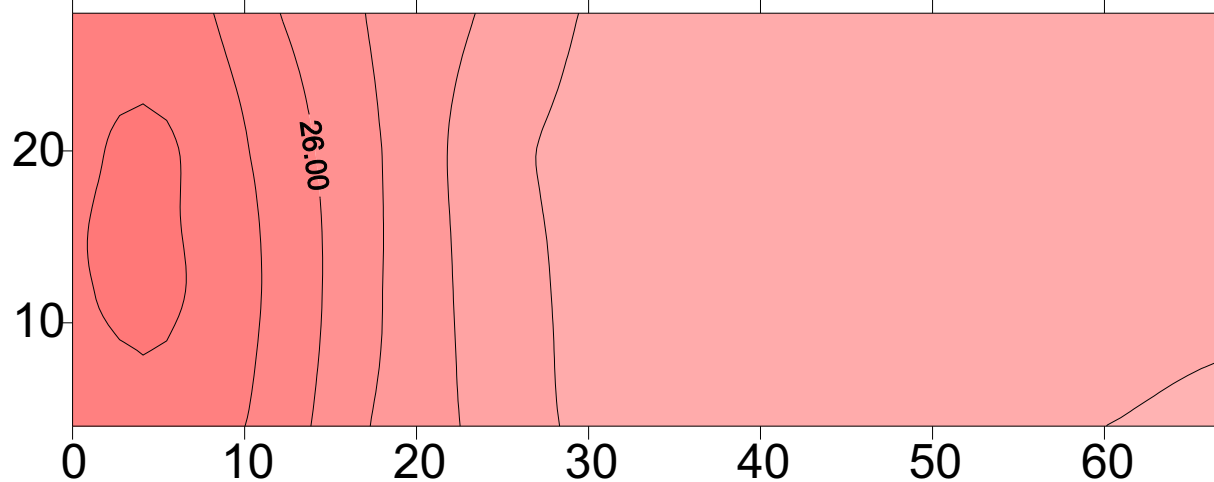
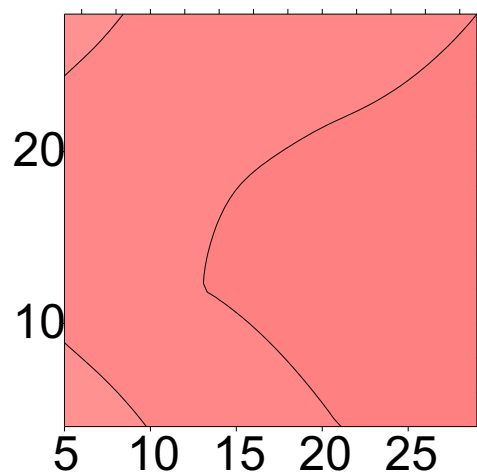


13:00

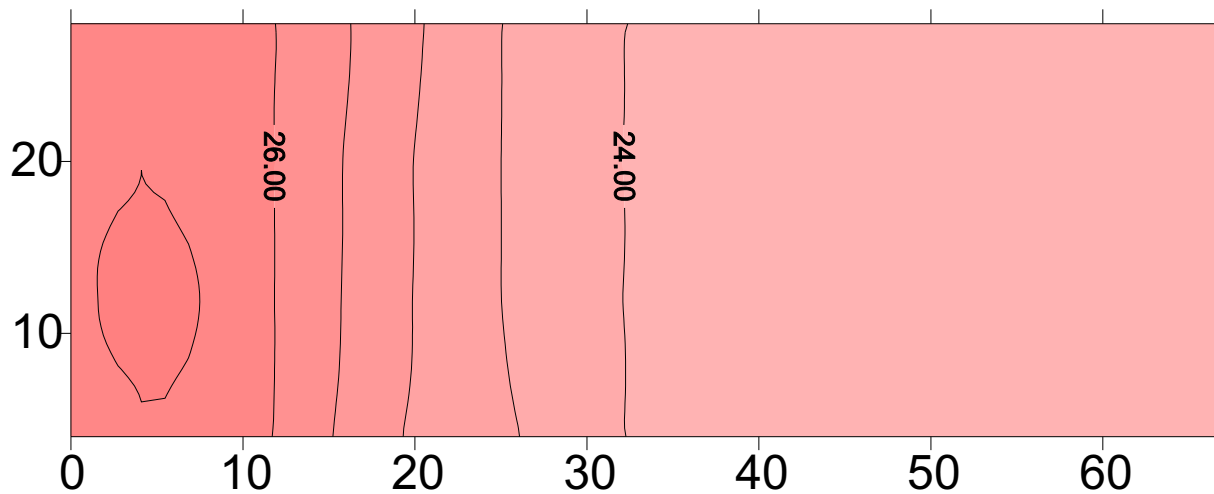
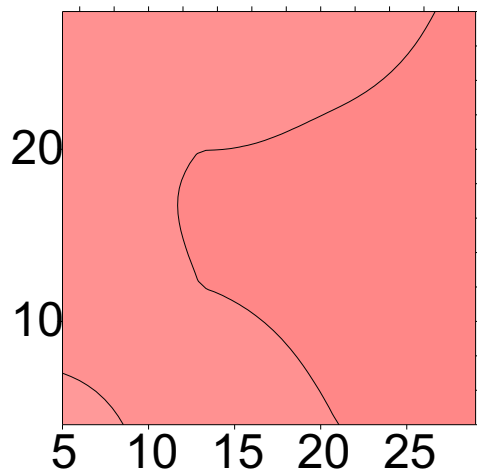


# Figura 9.37 m

13:10

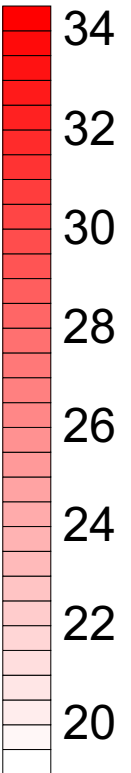
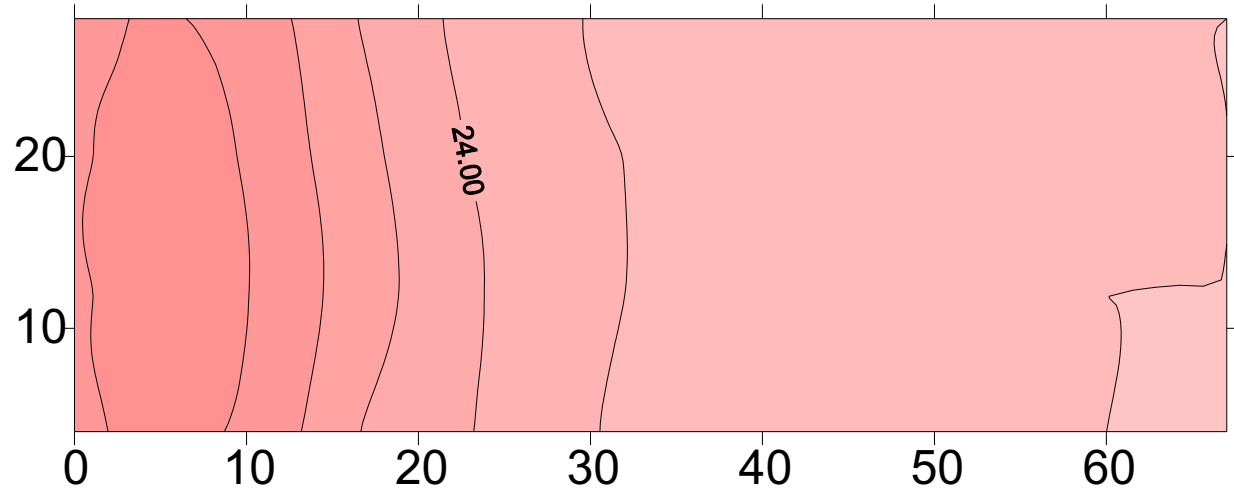
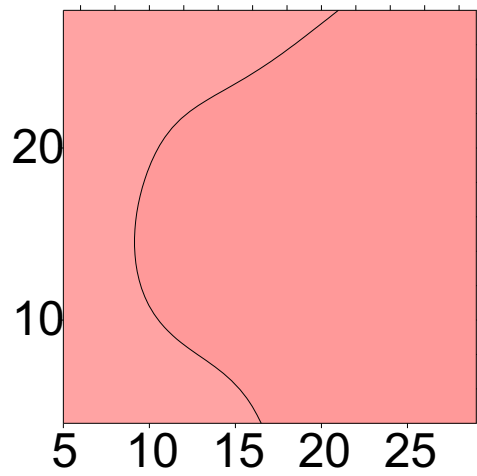


13:20

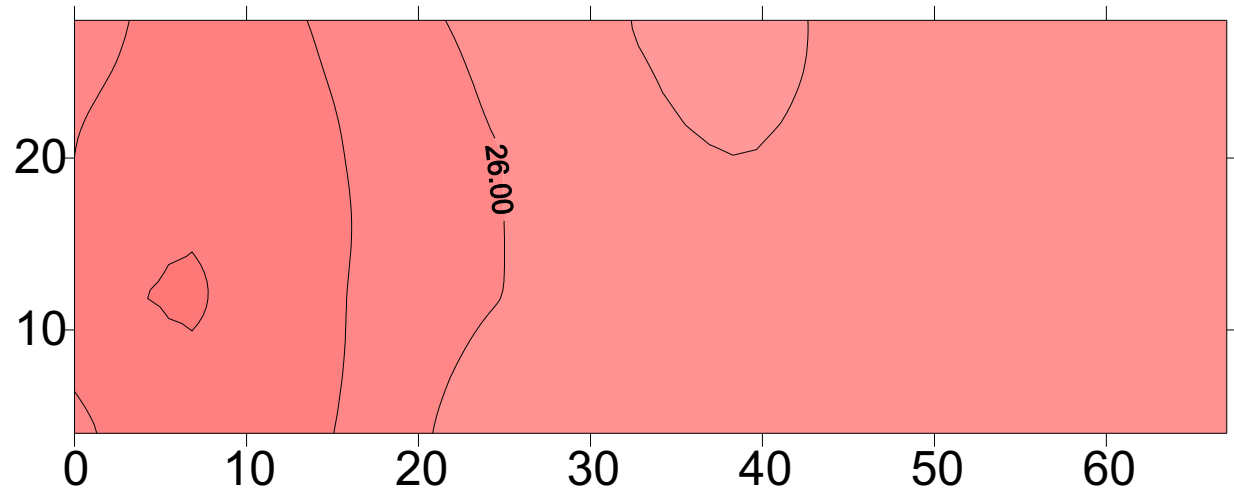
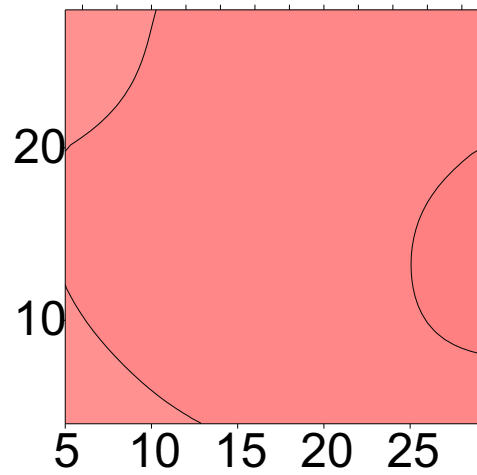


# Figura 9.37 n

13:30

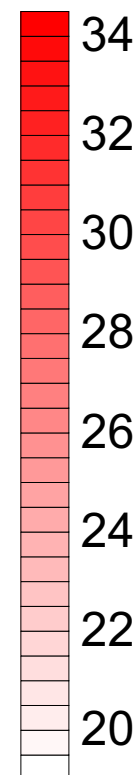
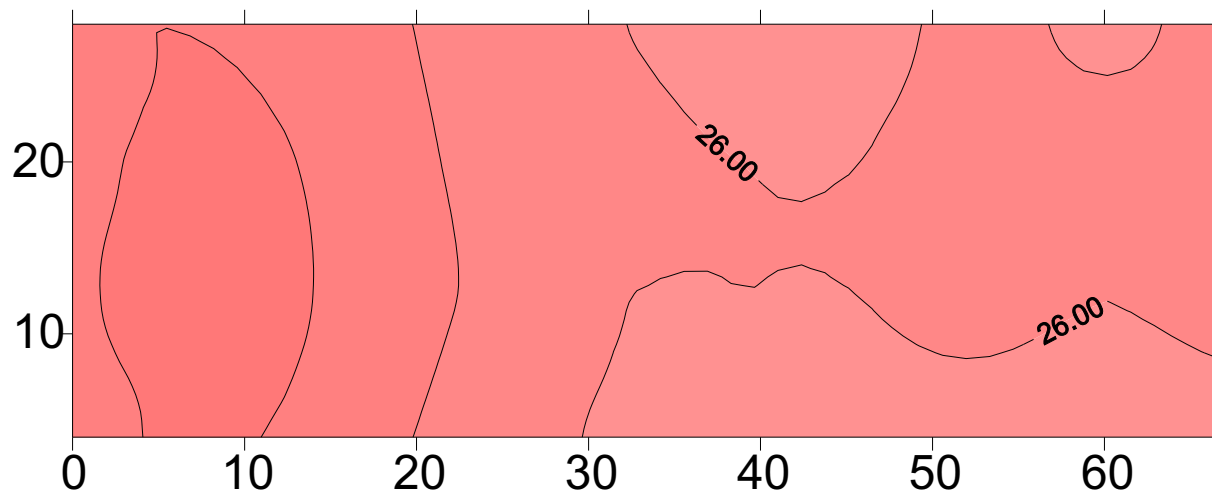
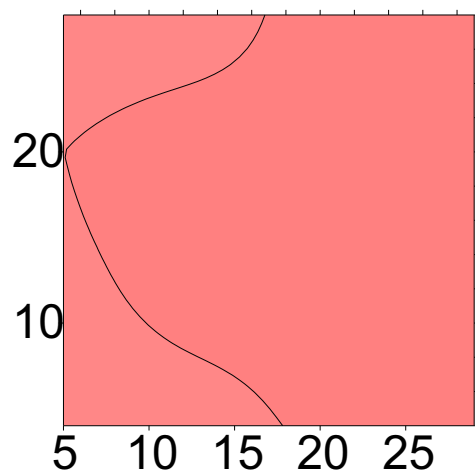


14:00



# Figura 9.37 o

14:30



**DETERIORO TÉRMICO DE MATERIALES PÉTREOS  
A ALTAS TEMPERATURAS**



## **10. Simulación mediante técnicas láser del quemado de materiales pétreos en incendios.**

A diferencia de los capítulos anteriores en los cuales se han estudiado diferentes facetas de los procesos de deterioro térmico causados por regímenes de temperatura medioambientales, los siguientes capítulos tratarán sobre aspectos relacionados con el deterioro de los materiales pétreos a altas temperaturas, es decir, al deterioro que los fuegos generan en los materiales pétreos en edificaciones.

Ambos procesos, el deterioro por insolación y el deterioro debido a incendios encuentran una causa común que es el efecto mecánico que los cambios de temperatura producen en los materiales. El deterioro de una roca como resultado de las variaciones de altas temperatura podría asemejarse al causado por los ciclos ambientales de calentamiento-enfriamiento, sin embargo, la diferencia de rangos en que estas variaciones de temperatura tienen lugar, hace que los mecanismos a través de los cuales puede generar deterioro sean diferentes. Así mientras que en la meteorización por insolación encontramos que las tasas de degradación son muy pequeñas (del orden de milímetros por siglo, como se ha observado en los casos estudiados en el capítulo anterior), los efectos que causa el fuego son inmediatos y se producen de manera general por efectos de choque térmico añadidos a la fatiga de los materiales. Además, las altas temperaturas alcanzadas en un fuego son suficientes en muchos casos para provocar cambios físico-químicos irreversibles en las rocas, de los cuales el más obvio es el enrojecimiento debido a la oxidación térmica de hierro.

Esto contribuye a que la experimentación en laboratorio del deterioro producido por un incendio sea más fácil, al obtenerse resultados con ensayos cortos, al contrario que lo que ocurre en el estudio del deterioro que las variaciones de temperatura de menor intensidad pueden causar. Más aún, hay que recordar lo que se ha citado anteriormente sobre muchos de los ensayos realizados por diversos autores que, para estudiar el deterioro por variaciones cíclicas de la temperatura ambiental, han utilizado rangos de temperatura muy elevados en un intento de acelerar el proceso de degradación térmica (p. ej. Griggs, 1936; Aires Barros et al., 1975; Franzini et al., 1984; Siegesmund et al., 2000; Weiss et al., 2004; Koch y Siegesmund, 2004).

Por tanto, al abordar uno de los objetivos de la presente tesis, que es el de contribuir al desarrollo tecnológico de técnicas para el ensayo en laboratorio del deterioro térmico de los materiales, se parte de una base completamente diferente que en el caso del deterioro causado por los ciclos ambientales de temperaturas. Mientras que en la situación anterior se partía de la ausencia de técnicas o equipamiento adecuado para la realización de ensayos de envejecimiento térmico y el objetivo era la creación de una técnica experimental nueva, en este caso el objetivo se centra en la búsqueda de una técnica que permitiera ensayar de forma satisfactoria muestras de pequeño tamaño obtenidas directamente del propio edificio, en vez de bloques obtenidos de canteras.

### 10.1. Técnicas experimentales existentes para el ensayo del deterioro de materiales pétreos por fuegos.



**Figura 10.1:** Horno para la experimentación del efecto del fuego en materiales pétreos (Cortesía de la Dra. M. Hajpál)

Dentro de que las referencias referentes al estudio experimental del comportamiento de los materiales pétreos frente al fuego no es muy amplia, los estudios realizados hasta la fecha se han realizado con hornos convencionales de laboratorio sobre muestras de varios centímetros cúbicos (p.ej. Goudie et al., 1992; Allison y Goudie, 1994; Chakrabarti et al., 1996; Hajpál, 2002, 2004, Hajpál y Török, 2004). Dado el tamaño de las muestras, los ensayos se realizaron sobre muestras no extraídas del edificio a las que se les aplicó un calentamiento por medio de una rampa de ascenso de temperatura, de tiempo variable desde unos minutos a horas, para



luego someterlas a un proceso de choque térmico mediante su inmersión en agua (p.ej. Chakrabarti et al., 1996) o a un descenso gradual de temperatura (p.ej. Goudie et al., 1992; Hajpál, 2002), de tal manera que *“las condiciones de los experimentos no reflejan enteramente los procesos que tienen lugar durante un fuego natural”* (Hajpál y Török, 2004).

Por otro lado, aunque en otros materiales de construcción es común la utilización de ensayos de inflamabilidad con soplete u otro tipo de llamas directas, no se han encontrado referencias que citen estos métodos para el estudio científico de los daños generados por el fuego sobre la piedra.

Durante un fuego en un edificio, se producen dos tipos de procesos que pueden producir modificaciones en los materiales:

El primero y más obvio deriva del calor producido por las llamas. Aunque el mecanismo por el que se producen los incrementos de temperaturas puede incluir en parte la conducción (cuando el objeto en llamas o partículas incandescentes se sitúan directamente en contacto con el material pétreo), el principal mecanismo de calentamiento de los materiales pétreos es la radiación (Ollier y Ash, 1983). Los diversos procesos químicos de reacción del combustible y gases (disociación de componentes volátiles, disociación de compuestos, cambios en los estados de excitación de los componentes, etc.) liberan energía en forma de radiación calorífica, visible e infrarroja. En concreto, la presencia de partículas y la luminosidad de las zonas más calientes de las llamas son los componentes principales en la emisión radiante de la llama, mientras que los componentes gaseosos son secundarios (Yuen y Chow, 2004) produciendo una emisión del tipo “Cuerpo Gris”(Yuen y Tien, 1976) con intensidades que llegan hasta los 100 KW/m<sup>2</sup> (Ollier y Ash, 1983). Estos factores no se ven reflejados en los ensayos que utilizan hornos, lo que resulta en un “falseamiento” del modelo, como se comentaba anteriormente.

El segundo proceso que puede introducir modificaciones en los materiales es el contenido en cenizas y componentes sólidos en los gases emitidos por un fuego. El rango composicional de las cenizas producidas varía mucho dependiendo del combustible que alimenta el fuego, aunque en general los elementos mayoritarios son C, Si, Al, Fe, Ca, S, P, K, Na y Ti en mayor o menor proporción. Los compuestos derivados de la combustión, al depositarse sobre o introducirse en el material pétreo,

generan de manera más obvia un impacto visual debido al ennegrecimiento que se produce en el material (ver figura 10.2), sin embargo, pueden producir efectos a más largo plazo, debido a que la lixiviación hacia el interior de los materiales de estos elementos (cosa que puede producirse desde un primer momento, dado que si el fuego ha sido en un edificio puede implicar que se haya extinguido con agua), puede generar como producto más nocivo sales, con todas las implicaciones que estas tienen en el deterioro de los materiales pétreos.



**Figura 10.2:** Ennegrecimiento de materiales pétreos debido a cenizas de un fuego.

Los diseños experimentales previos no han tenido en cuenta esta acción fisicoquímica que las cenizas pueden provocar en los materiales pétreos tras un incendio. Hasta la fecha los estudios se han centrado solamente en el efecto producido por el aumento de temperatura dado que, entre otras razones, la experimentación con hornos no deja lugar para la introducción de este factor en la experimentación.

Como otro factor destacado de los ensayos realizados con hornos, se encuentra el hecho del tamaño de las muestras que se utilizan, que resulta demasiado grande en el caso de no poseer material de cantera disponible.

## **10.2. Consideraciones metodológicas para la elección de una nueva técnica de ensayo.**

### **10.2.1. Material de partida y cantidad de muestra.**

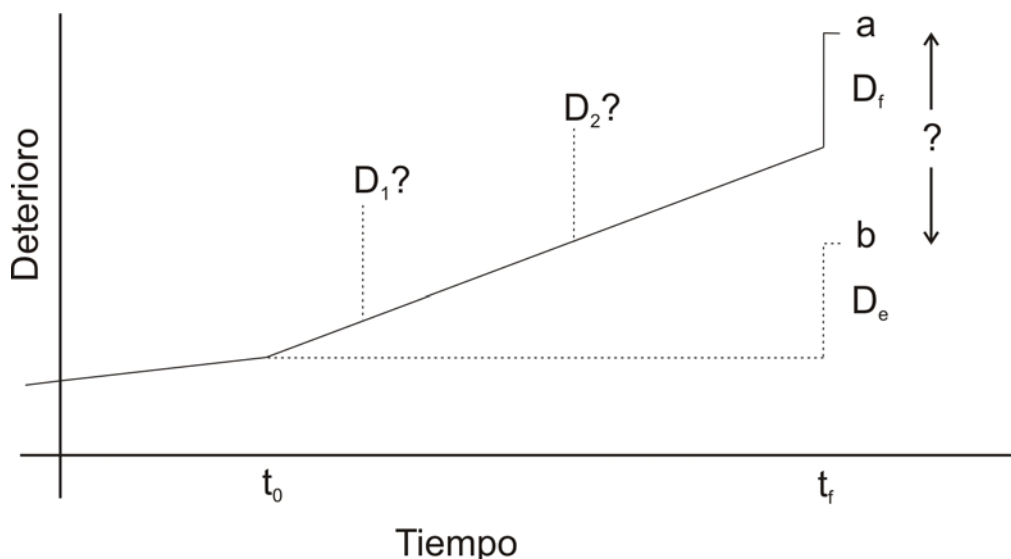
Una de las principales limitaciones que las técnicas experimentales basadas en hornos presentan es la cantidad de muestra que se debe de utilizar. Los materiales

pétreos de un edificio, al igual que en la naturaleza, se comportan como un material dinámico que no permanece inmutable una vez puesto en obra. Las cargas dinámicas o los agentes de deterioro externos generan cambios continuamente en el material, que presentará, para un tiempo dado, un *grado de deterioro* determinado que dependerá de la historia concreta de cada material una vez puesto en el edificio. El fuego, es un agente de deterioro que actúa instantáneamente, “rompiendo” la evolución continua de esta historia. El carácter puntual de este agente realza la importancia de ensayar los materiales teniendo en cuenta su historia previa al incendio, puesto que esta va a condicionar los efectos del agente instantáneo. En el estudio de materiales de edificios esto se consigue estableciendo como estándar de comparación la misma roca del edificio que no haya sufrido el fuego, pero en el caso de ensayos de laboratorio es recomendable partir de material del propio edificio si existe disponibilidad de acceder a estas. Cuanto más pequeña sea la cantidad de muestra que se tenga que usar, más probabilidades tenemos de obtenerla directamente de zonas no afectadas del edificio sin dañarlo en exceso.

El gráfico de la figura 10.3 recoge de manera esquemática la justificación del uso de muestras del propio edificio. Esta figura representa de manera simplificada la tasa de deterioro como un parámetro constante a lo largo del tiempo, aunque esto no necesariamente tiene que ser así, dado que en muchos procesos lo que se observa son tiempos más o menos largos de estabilidad seguidos de aumentos puntuales del grado de deterioro. El momento  $t_0$  equivaldría al momento de puesta en obra de determinado material. La historia tectónica previa, la meteorización subaérea o los mismos procesos industriales previos a la colocación del material en el edificio condicionan un grado de “deterioro” inicial sobre el que se acumula los efectos sufridos a partir de su colocación en el edificio.

La situación que encontramos después de un fuego real sería un aumento brusco de su grado de deterioro ( $D_f$ ), que depende del estado concreto del material en ese momento  $t_f$ . Un evento similar en otro punto temporal generaría un grado de deterioro ( $D_1$ ,  $D_2$ ) que desconocemos y que no podemos garantizar que sea igual. De igual manera, al ensayar una muestra de cantera que no ha sufrido los procesos operantes en el edificio, obtendremos un grado de deterioro ( $D_e$ ) que no tiene por qué corresponder a lo que se observa en las muestras reales del edificio. En un caso extremo podría darse la

situación de que al ensayar una muestra de cantera determinada con unas condiciones (temperatura) iguales a las observadas en un incendio en un edificio obtuviéramos un grado de deterioro  $D_e$  igual a cero que no correspondiese con el deterioro real, ya que este último se produjo debido a que existían unos procesos previos de fatiga del material.



**Figura 10.3:** Modelo de la evolución del deterioro en un material en un edificio suponiendo una tasa constante de deterioro (a) sobre el que actúa un procesos instantáneo (fuego) frente al resultado teórico que se obtendría al utilizar una muestra de cantera (b). ¿El deterioro producido por un fuego determinado ( $D_f$ ) será el mismo que hubiera causado en otro punto ( $D_1, D_2$ ) y que el que realmente se obtiene al ensayar una muestra de cantera ( $D_e$ )?

De hecho, el grado de deterioro  $D_f$  que se asigna para un material deteriorado en  $t_f$  va a depender del punto que tomemos como estándar de material no deteriorado. Muchos autores han sugerido el uso de materiales de cantera como estándar para la cuantificación del deterioro (p. ej. Rodríguez y Alcalde, 1998; Álvarez et al, 2002). Este punto de partida se aplica frecuentemente también a la evaluación de tratamientos de protección (Villegas, 1991; Esbert y Alonso, 1995). Sin embargo, dado que el deterioro producido por un agente puntual se suma a los procesos de deterioro previos, es importante el poder utilizar material de la etapa inmediatamente anterior a  $t_f$  al ensayar los efectos del fuego.

Otro aspecto a tener en cuenta sería si la realización de estos ensayos se centra en generar modelos de predicción del comportamiento de los materiales de un edificio. De

no usar materiales del propio edificio, los resultados infravalorarían el daño que el fuego produciría en los materiales.

Para poder utilizar materiales del propio edificio, la técnica a aplicar debe de ser compatible con la utilización de cantidades de muestra pequeñas. Los edificios históricos son bienes extremadamente delicados y la recogida de muestras en ellos se debe de reducir al mínimo posible.

### **10.2.2. Precisión en la reproducción de la física del proceso real de quemado**

Como se ha citado anteriormente el fuego produce efectos en los materiales pétreos debido a un calentamiento por radiación y a la introducción de nuevos componentes en el sistema que forma la piedra. De tal manera la elección de una nueva técnica experimental debe de tener en cuenta ambos aspectos.

A lo largo de todos los capítulos anteriores de esta tesis se ha discutido extensamente sobre las diferencias que existen entre los procesos de calentamiento por convección y por radiación. La eficacia del proceso y el régimen de temperaturas que se alcanza en el material es completamente diferente. Hasta la fecha el concepto de temperatura de superficie no se ha tenido en cuenta en la experimentación del fuego en piedra. El proceso del fuego se ha simplificado al establecimiento de una temperatura determinada como condición de contorno en un horno donde el calor se transmite principalmente por transporte de masa en el aire del interior. De manera análoga al caso de las temperaturas en el rango ambiental, esto no garantiza que el régimen de temperaturas alcanzado en el material ensayado corresponda con la situación real de un fuego que alcanzase esa temperatura. Así, al ensayar una muestra en un horno a una temperatura determinada, realmente desconocemos el régimen real de temperaturas que gobierna los cambios producidos en el material.

Una técnica adecuada para el ensayo en laboratorio de un material en un fuego debe replicar este proceso de calentamiento por radiación y permitir que se recojan las temperaturas del material, al menos en superficie, para poder tener una idea más clara del régimen térmico real en el material. Como en el caso del ensayo de materiales en regímenes térmicos ambientales, si calentamos una muestra a una temperatura

determinada mediante transporte de masa, es decir, si establecemos como condición una temperatura determinada del aire que rodea la muestra, estaremos subestimando el efecto que un determinado fuego puede generar en el material, pues el rendimiento en la transferencia de calor del proceso de transporte de masas es muy inferior al rendimiento que se obtiene por radiación, como se ha venido observando a lo largo de los capítulos previos.

Cualquier nueva técnica propuesta ha de posibilitar también que se pueda introducir material durante el proceso de quemado, para así tomar en consideración la introducción de nuevos componentes que la existencia de cenizas pueda generar.

### **10.3. El láser como técnica para la simulación del fuego en materiales pétreos.**

El láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es una radiación extremadamente monocromática que se produce debido a saltos energéticos en un medio excitado. Los dispositivos láser se llevan utilizando en diferentes aplicaciones científicas y tecnológicas desde los años 60, por su alta eficacia para confinar radiación en un pequeño ángulo sólido y su alta monocromaticidad, de modo que gozan de un gran peso específico a nivel científico e industrial. En particular, es interesante por el gran control que se puede ejercer sobre su proceso.

El uso del láser en aplicaciones *patrimoniales*, es decir en todo lo referente al ensayo o conservación de materiales del patrimonio cultural, se remonta a la década de los 70, siendo los primeros trabajos sobre el tema realizados por Asmus et al. (1973a, 1973b). La mayoría de las aplicaciones del láser se han centrado en la limpieza de costras negras (Gobernador-Mitre et al., 1996; Cooper, 1998; Costela et al., 2003) o incluso de tratamientos de protección (Gomez-Heras et al., 2003) y la caracterización de los materiales mediante técnicas espectroscópicas como la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) (Maravelaki et al., 1999, 2001). Sin embargo, no se había usado hasta el momento para la simulación de procesos de deterioro de materiales pétreos a altas temperaturas.

Su uso para reproducir en el laboratorio la acción de un fuego encuentra su justificación en las consideraciones expuestas anteriormente. Debido a su carácter focalizado, permite realizar ensayos en zonas muy pequeñas, minimizando la cantidad de muestra que se utiliza, lo que supone una enorme ventaja porque permite utilizar muestras extraídas del propio monumento, sin que esto suponga dañarlo realizando una toma excesiva de material. Como se ha comentado anteriormente el uso de muestras del monumento supone una ventaja metodológica con respecto a los ensayos sobre muestras de cantera realizados en hornos o con llama directa, pues permite tener en cuenta la *historia previa* de deterioro del material. La figura 10.4 muestra el resultado de un ensayo con láser sobre un fragmento de piedra arenisca extraída de un edificio, en el que se observa como en una muestra de unos 6 x 4 cm se han realizado tres ensayos de quemado a diferentes temperaturas.



**Figura 10.4:** Muestra de arenisca de un edificio en la que se han realizado tres ensayos de quemado con láser.

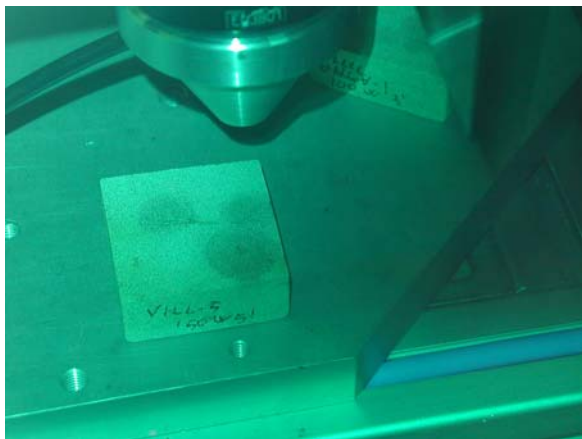
Estas zonas de ensayo limitadas, ciertamente condiciona el tipo de técnicas analíticas a utilizar. El enfoque tradicional del estudio de los efectos que produce el fuego se ha centrado fundamentalmente en los cambios físicos de conjunto, especialmente el cambio de color y la disminución de resistencia mecánica debida a la expansión diferencial de los minerales a altas temperaturas. (Allison y Goudie, 1994;

Chakrabarti et al., 1996; Ehling y

Kohler, 2000; Ollier y Ash, 1983; Winkler, 1997) mientras que las referencias sobre cambios mineralógicos y/o texturales a pequeña escala es escasa (p.ej. Hajpál, 2002; Gómez-Heras et al., 2004c; Hajpál, 2004). Sin embargo, estos efectos a pequeña escala pueden (y deben) usarse como punto de partida para entender los procesos a mayor escala, tanto en términos de espacio como de tiempo, dado que los sistemas de fracturas a pequeña escala son clave para la comprensión de los procesos mecánicos singenéticos macroscópicos, y la previsión de posibles procesos a largo plazo pasa necesariamente por el conocimiento de los cambios a pequeña escala (cambios en sistema poroso, elementos nuevos, cambios minerales, etc.)

Con respecto al mecanismo de acción del láser, el calentamiento que produce es obviamente por radiación, pudiéndose seleccionar la composición espectral de la emisión en función del tipo de láser que se este utilizando. Los sistemas láser permiten además un control muy preciso de la potencia de la radiación emitida en  $\text{W/m}^2$ , lo que supone una ventaja adicional con respecto a los ensayos de horno o con llama directa en los cuales el control de las condiciones experimentales es mucho más limitado. Así, el calentamiento por medio de láser refleja más precisamente el mecanismo físico de calentamiento por el cual un fuego puede afectar a un material pétreo.

Los ensayos por medio de láser tiene la ventaja de facilitar el control del proceso de quemado mientras ocurre. Los sistemas de tipo horno funcionan como una *caja negra* en el sentido de que conocemos las condiciones iniciales de la muestra y las finales, pero no podemos ejercer ningún control durante el proceso. Los ensayos con láser permiten la interacción con la muestra durante el proceso de quemado, de manera que se puede interferir, por ejemplo añadiendo cenizas, mojando la muestra mientras se realiza el ensayo o cualquier tipo de condición externa que consideremos replique en mayor medida una determinada situación de fuego. Aunque no aplicado a estos casos, existen antecedentes de la introducción de material externo y estudios de cómo la radiación interacciona con flujos de partículas sólidas en la zona de incidencia del rayo láser.



**Figura 10.5:** Láser en funcionamiento mientras se realiza un ensayo de quemado sobre arenisca. El color verde de la imagen se debe al filtro de protección necesario durante los ensayos.

Al no ser necesario realizar los ensayos en una cámara cerrada, se facilita también en gran medida la toma de datos durante el ensayo, pudiéndose observar *de visu* como va cambiando la muestra a medida que sufre el proceso de quemado (cambios progresivos de color, pérdida de material, etc.) y realizar la toma de temperaturas superficiales de una manera más flexible.

Todas estas ventajas hacen que la simulación del quemado durante incendios de materiales pétreos, sea una aplicación novedosa y muy conveniente de la técnica láser.



Aunque el uso de láseres conlleva la principal desventaja del alto costo de la técnica (mucho más alto que el de cualquier horno convencional) y la dificultad de acceder en determinados casos a este equipamiento, las ventajas que ofrece hacen que se pueda considerar una técnica muy válida para el ensayo de materiales pétreos a altas temperaturas.

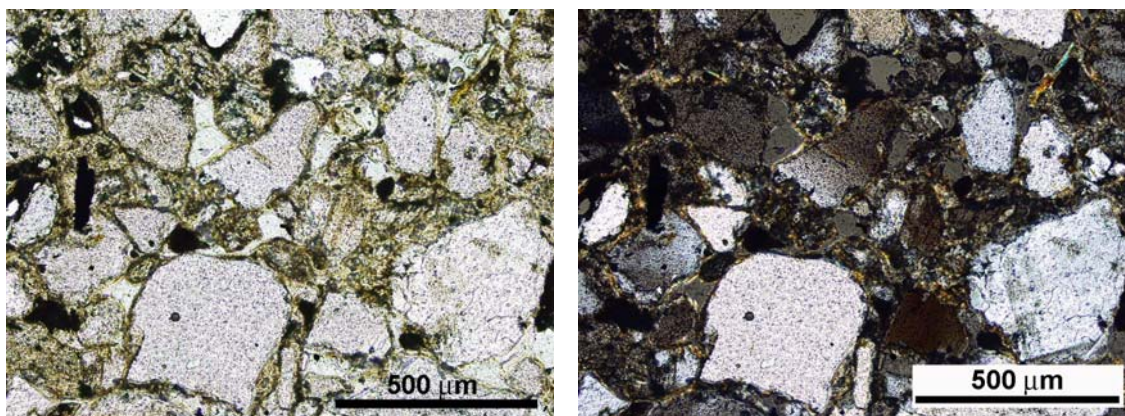
#### **10.4. Descripción de los materiales y diseño del experimento.**

Aunque se ha comentado que una de las principales ventajas del uso del láser es la posibilidad de ensayar materiales obtenidos de un edificio, el carácter exploratorio de esta investigación desaconsejó la utilización de muestras de monumentos, debido al previsible gasto de material en las pruebas de puesta a punto de los experimentos. La puesta en marcha de una técnica nueva siempre supone mucho más material que el que luego se necesita realmente para realizar ensayos. Así, solo se realizó una prueba piloto al final del estudio, con uno de los tipos de material ensayado, pero obtenido de un edificio, para corroborar la adecuación de esta técnica a este tipo de muestras y comparar además los resultados obtenidos para las muestras de cantera y las del edificio.

Se seleccionaron dos tipos de areniscas para este estudio. Una arcosa denominada como *Piedra de Villamayor* y una arenisca calcárea conocida como *Piedra de Uncastillo*. Estos dos materiales se seleccionaron por diversas razones. Ambos son materiales de construcción que se han utilizado en España al menos desde tiempos romanos; la *Arenisca de Villamayor* en la zona de Salamanca y la *Piedra de Uncastillo* en la comarca de las *Cinco Villas*, al noroeste de la provincia de Zaragoza. Ambas areniscas muestran cambios macroscópicos importantes debidos al fuego, especialmente en lo que se refiere a cambios de color, lo que hace que el patrimonio de estas dos zonas presente numerosos ejemplos muy visibles de monumentos afectados por procesos de deterioro debidos al fuego.

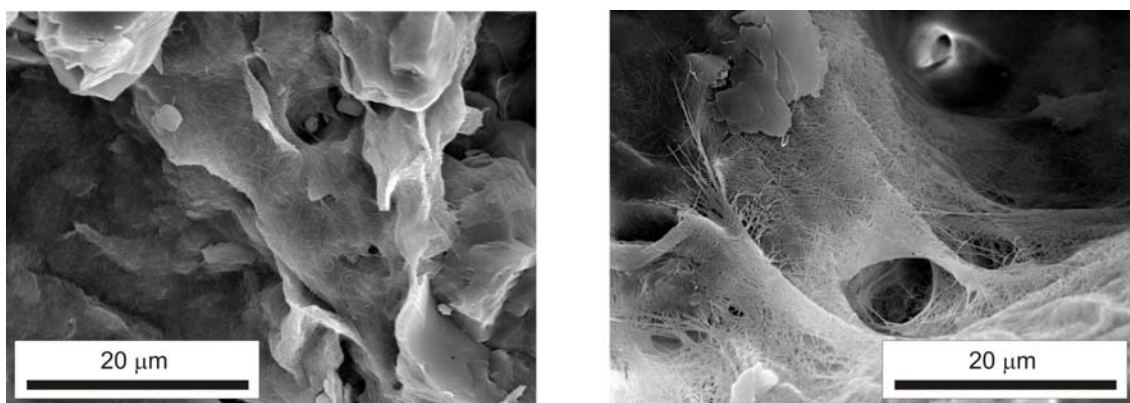
Según la clasificación de Pettijohn et al. (1972), la *Arenisca de Villamayor* es una subarcosa de grano fino (media 0,21 mm) matriz-soportada con una relación esqueleto/pasta/porosidad de 55/13/32 (ver figura 10.6). Los principales constituyentes

del esqueleto son cuarzo monocristalino de angular a subredondeado y feldespato potásico. De manera accesoria aparecen minerales opacos. La matriz contiene fragmentos detríticos de micas (moscovita), minerales de la arcilla como illita y esmectita formando una fina capa que rodea los granos y paligorskita que se presenta como una red de agregados fibrosos que rellenan los poros (figura 10.7).



**Figura 10.6:** Fotomicrografías de Arenisca de Villamayor con nícoles paralelos (dcha.) y cruzados (izq.)

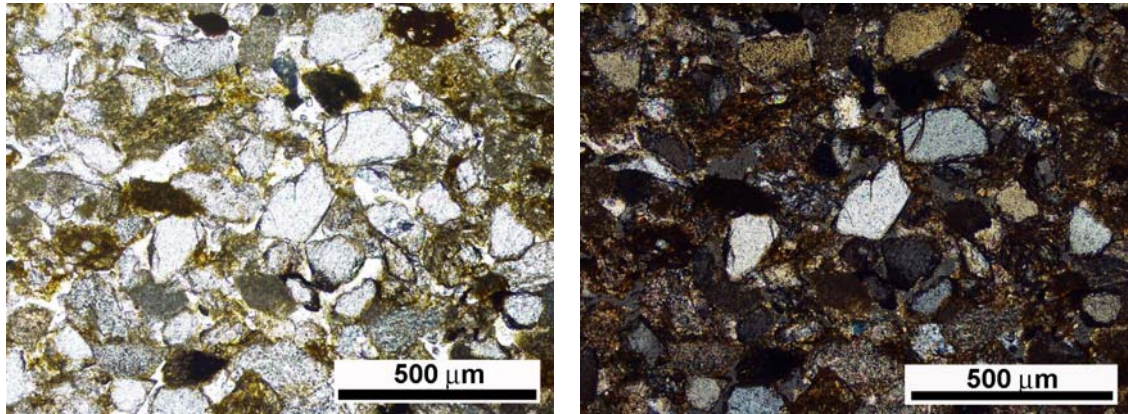
Las canteras de este material se sitúan a unos 5 Km al oeste de la ciudad de Salamanca (Barroso, 1944) y están relacionados con canales discontinuos eocenos (Arrese et al., 1964; Jimenez, 1972).



**Figura 10.7:** Fibras de paligorskita en arenisca de Villamayor. Imágenes SEM-SE

La piedra de Uncastillo (figura 10.8) es una litoarenita calcítica granosoportada de grano medio (0,29 mm). La relación esqueleto/pasta/porosidad es de 60/20/20. Los principales constituyentes del esqueleto son cuarzo (mono, policristalino y chert),

fragmentos de roca carbonática, feldespato potásico, plagioclasa y moscovita. La matriz compuesta básicamente de calcita (micrita) tanto como matriz detrítica y como pseudomatriz. La presencia de minerales de arcilla (illita fundamentalmente) es muy escasa y presenta algunos cementos esparíticos como rasgo accesorio.



**Figura 10.8:** Fotomicrografías de Piedra de Uncastillo con nicoles paralelos (dcha.) y cruzados (izq.)

Las explotaciones de esta arenisca se sitúan en afloramientos que consisten en capas lateralmente discontinuas que están relacionadas con un sistema de canales dentro de la formación terciaria de Uncastillo en el prepirineo Aragonés (Soler y Puigdefabregas, 1970).



**Figura 10.9:** Láser de diodo utilizado en este experimento (a) y cabezal en la zona de ensayo (b) a donde llega la radiación por medio de un canal de fibra óptica.

Con respecto al sistema láser, para este estudio se trabajó con un *láser de diodo* Roфин-Sinar DL 27 con un cabezal guiado por fibra óptica y una potencia máxima de 2700 W nominales (que debido al calentamiento de la fibra óptica sufre unas pérdidas

tabuladas de un 15 %). Un láser de diodo es aquel en el cual la excitación que produce la radiación láser se obtiene mediante un semiconductor ópticamente activo (LED). Este láser tiene dos conjuntos de diodos que emiten en dos longitudes de onda diferentes en el infrarrojo cercano: 808 y 940 nm, que están por tanto incluidas en la zona “térmica” del espectro normal de un fuego. La huella o *spot* que este láser irradia sobre las superficies es de simetría circular, siendo la intensidad de la radiación ( $\text{W/m}^2$ ) prácticamente constante en el interior de esta huella circular, lo que permite una acción uniforme de la radiación en el espacio de ensayo.

Los principales parámetros que se deben controlar al diseñar el experimento son:

Distancia entre el foco del láser y la muestra: La superficie del *spot* se va incrementando cuanto mayor es la distancia al foco puesto que la geometría de la radiación emitida es cónica. Variando la distancia al foco podemos controlar el área de aplicación más adecuada para los ensayos. En este caso se usó un *spot* para los experimentos de 7,5 mm.

Potencia del láser: Esto condiciona la intensidad de la radiación incidente, y por tanto el rango del fuego que se está ensayando. Tras las pruebas preliminares se seleccionaron 3 potencias entre 100 y 150 W nominales, que aplicadas las pérdidas suponen unas irradiaciones de 11,3 a 17  $\text{kW/m}^2$ .

Tiempo de exposición a la radiación: Debido a que los efectos que obtengamos en el material dependerán del tiempo de exposición y a la necesidad de valorar si la acción prolongada de una radiación de menor intensidad puede provocar efectos similares que una radiación mayor durante menos tiempo. Como corresponde a un proceso de calentamiento por radiación la temperatura se incrementa rápidamente y la pendiente se va suavizando siguiendo una función logarítmica, hasta llegar a una temperatura constante. Se realizaron dos tipos de ensayos, uno manteniendo la temperatura tres minutos desde el momento en el que la temperatura se estabilizaba y otros con cinco minutos.

Se realizaron dos tipos de experimentos; el objetivo de la primera serie fue evaluar los parámetros más adecuados de este tipo de láser para la simulación de fuegos. Esta serie consistió en el calentamiento de cada uno de los materiales seleccionados a tres potencias nominales distintas (100, 125 y 150), con dos tiempos de exposición distintos (3 y 5 minutos) para cada una de las potencias, siendo el *spot* constante en todas ellas.

Dentro de esta serie de experimentos se realizó el ensayo sobre muestras secas y sobre muestras que se saturaron 48 h en agua, para observar los efectos que el aumento de temperatura pudiera tener en una muestra húmeda.

La segunda serie de experimentos se centró en establecer la variación de las propiedades de estos dos materiales para una serie de temperaturas de superficie fijas (de 200 a más de 900 en múltiplos de 100 y/o 50 °C), manteniendo constante el spot, pero con unos valores más bajos y variables de potencias para obtener una curva de aumento de temperatura de menor pendiente que permitiese interrumpir el experimento al alcanzar la temperatura de superficie prefijada. La temperatura superficial se midió mediante un termómetro de infrarrojos *Raynger* con límite máximo de lectura de 900 °C (de ahí que en el último experimento no se pudiera determinar con exactitud la temperatura, aunque se infiere un valor de alrededor de 1000 °C).

Las muestras ensayadas eran pequeños bloques de 5 x 5 x 2 cm. Sin más tratamiento que el corte con sierra diamantada. Para la caracterización de los materiales y su deterioro se tuvieron que usar técnicas de análisis no destructivas o que utilizaran poca muestra, debido a que el área de ensayo es limitada. Así, se realizaron observaciones de microscopía electrónica en modo SEM-SE. Se midió el cambio de color sufrido así como el área superficial y la profundidad de las zonas con cambios de color. La caracterización incluyó también medidas de rugosidad y porosimetría de mercurio. Para el análisis de cambios composicionales se utilizó XRD (utilizando un portamuestras orientado para minimizar la cantidad de muestra utilizada) y análisis de contenidos en hierro ferroso y férrico por medio de valoración con permanganato potásico tras ataque ácido.

### **10.5. Ensayos para la optimización de las condiciones de aplicación del láser.**

Como se ha indicado, la primera serie de experimentos perseguía situar los parámetros más adecuados para que la experimentación con el láser reflejara las condiciones que se pueden dar en un incendio habitual. Para ello se realizaron una serie



de ensayos previos, tomando como referencia la correspondencia que pudiera tener el resultado del experimento con el deterioro observado en edificios reales.

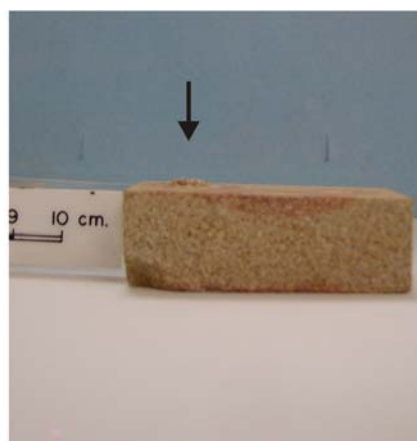
El tamaño del spot fue el primer parámetro que se fijó. Se escogió 7,5 mm como tamaño suficiente para poder realizar medidas de color con el espectrofotómetro *Minolta CM-2002*. Los primeros ensayos se realizaron con potencias nominales de entre 300 a 400 W (aproximadamente 30 a 45 kW/m<sup>2</sup> efectivos para el spot seleccionado) para mantener un margen de seguridad con el valor máximo citado anteriormente de 100 kW/m<sup>2</sup> para un fuego intenso.



**Figura 10.10:** Aspecto de la Arenisca de Villamayor sometida a una potencia nominal de 350 W durante aproximadamente un minuto.

Las primeras pruebas con estas potencias producían efectos muy profundos en la piedra en un corto periodo de tiempo llegándose a fundir parcialmente la superficie en el caso de la Arenisca de Villamayor con mayor contenido en cuarzo (ver figura 10.10). Esto supone temperaturas de más de 1710 °C, que es el punto de fusión del cuarzo (Hodgman, 1961) y gradientes de temperatura en la horizontal de más de 1500

°C/cm considerando el hecho de que los círculos concéntricos que se observan nos indican la temperatura a la que ha llegado el material y el enrojecimiento del material se relaciona con la oxidación térmica del hierro a unos 300 °C.

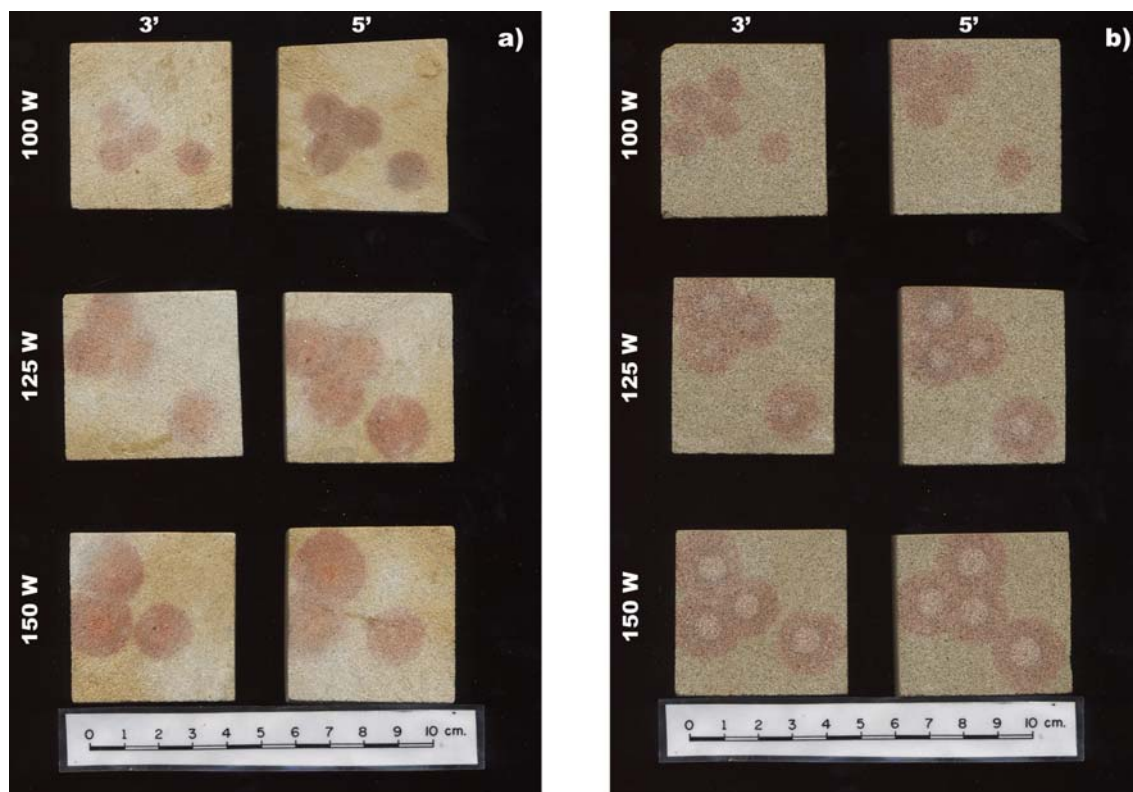


**Figura 10.11:** Imágenes de procesos de calcinación-rehidratación en Arenisca de Uncastillo tras calentamiento con láser con altas potencias nominales.

Resulta destacable que, aparte de la fusión en la zona central, no se observaron daños mecánicos a escala macroscópica (fracturas, pérdida de material, etc.) independientemente del notable gradiente térmico y de que este se alcanzó en un periodo de tiempo que oscilaba del orden del minuto, lo que conduce a pensar que las areniscas no son muy susceptibles a presentar este tipo de morfologías debido al fuego.

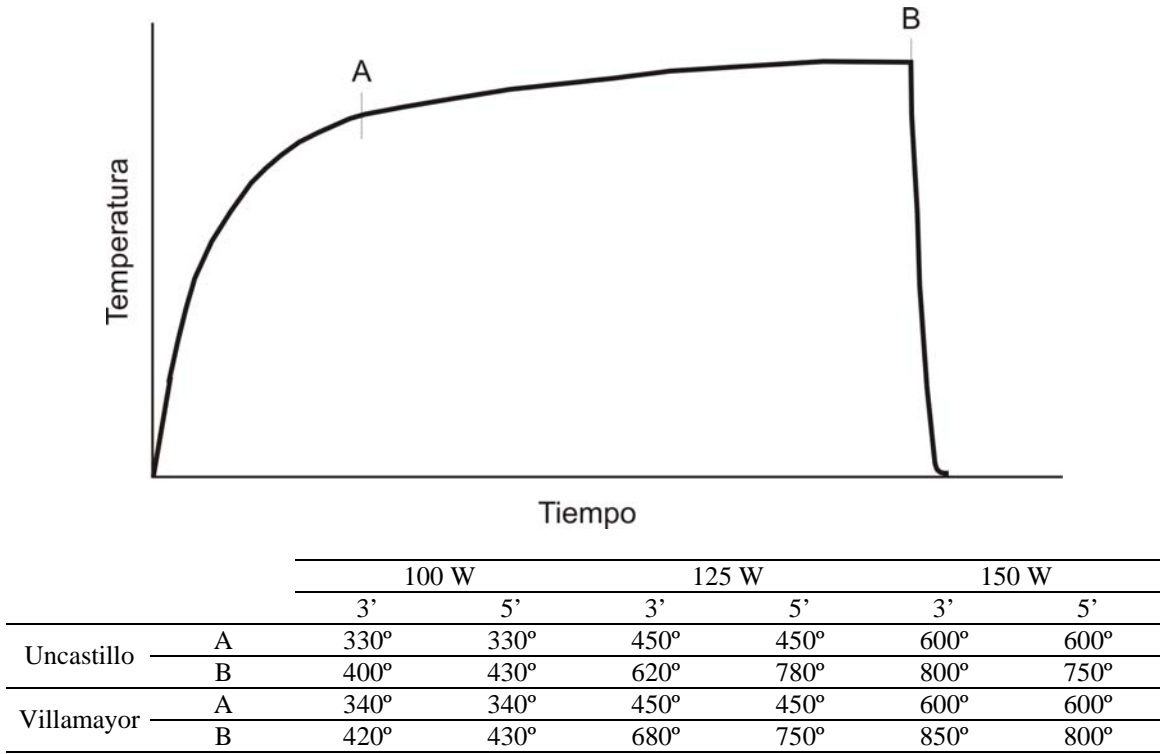
En el caso de la arenisca de Uncastillo la intensidad de la vitrificación era mucho menor (lo que no sorprende al tener menor contenido en cuarzo) y aunque instantáneamente no se produjeron efectos macroscópicos, a los pocos días de situadas las muestra a temperatura y humedad ambiente, se producía una desagregación granular de la zona afectada (figura 10.11) debida a la calcinación de la calcita y su posterior rehidratación.

Posterioros ensayos dieron como resultado final la batería de muestras que se observa en la figura 10.12. Se observó que los parámetros idóneos de potencia nominal para obtener en el ensayo de este tipo de muestras resultados comparables a los que se encuentran en los edificios oscila entre los 100 y los 150 W, con tiempos de exposición desde el comienzo de la estabilización de la temperatura en torno a 3 y 5 minutos.



**Figura 10.12:** Resultado de los ensayos con diferentes potencias y tiempos para la Arenisca de Villamayor (a) y la Piedra de Uncastillo (b). 100 W equivalen a  $11,3 \text{ kW/m}^2$

La evolución de la temperatura superficial durante los ensayos sigue la pauta que se observa en la figura 10.13 definida por una función logarítmica. La temperatura constante indica que el material ha llegado a un estado de equilibrio, en el que la energía que recibe es igual a la que puede absorber la estructura del material; por eso la temperatura no sube. El valor de ese máximo de temperatura depende de los parámetros térmicos del material (Calor específico, conductividad, etc.) y de los cambios químicos y/o estructurales que se producen en el material ya que durante el proceso de calentamiento la energía térmica recibida se invierte en los cambios estructurales del material.



**Figura 10.13:** Caso general de evolución de la temperatura durante el calentamiento y valores de temperatura (°C) alcanzados al principio (A) y al final (B) de los ensayos para cada una de las potencias nominales (W) y tiempos de ensayo en minutos (').

La figura 10.13 representa la evolución de temperaturas de superficie que se obtiene en los ensayos de calentamiento, expresándose de forma general. En esta distribución se marca un punto A, que corresponde al momento en que la pendiente de la evolución se reduce sensiblemente y que se tomó como punto a partir del cual se comenzó a medir el tiempo de exposición a la radiación (3 ó 5 minutos) y el punto B que sería el punto en el



que se da por terminado el ensayo una vez pasado el tiempo de radiación prefijado. La tabla que acompaña a la figura indica los valores de temperaturas superficiales alcanzados en ambos puntos de la evolución de temperaturas.

Sobre estas muestras se realizaron una serie de ensayos no destructivos, principalmente color y rugosidad de las muestras, para evaluar los efectos macroscópicos que el láser produce para relacionarlos con los efectos que se pueden producir en un monumento y su validez como caracterizadores de las temperaturas alcanzadas en el incendio. En este caso se seleccionó el uso de ensayos no destructivo por ser los más aconsejables para realizarse en un monumento de manera previa a la consideración de cualquier toma de muestras. Si existe una correlación suficiente entre potencia suministrada y estas medidas se puede considerar que a partir de una toma preliminar de medidas no destructivas en el monumento se podría evaluar a priori los parámetros láser más adecuados para una posterior investigación sobre muestras recogidas del monumento.

Con respecto al color, existe en ambos materiales una evolución clara con respecto a la potencia suministrada. Esto se observa más fácilmente en el caso de la arenisca de Uncastillo, más homogénea en cuanto a su color. La Tabla 10.1 recoge las medidas de color para la arenisca de Uncastillo a las diferentes potencias estudiadas. Si se comparan los valores dejando tanto la potencia como el tiempo constantes se observa una evolución en el mismo sentido en la cual la luminosidad ( $L^*$ ), sufre un descenso con respecto a la muestra sin calentar, pero sigue una pauta ascendente a medida que la potencia o el tiempo aumentan. Con respecto al parámetro  $a^*$  aumenta drásticamente con respecto a las muestras sin irradiar pero muestra un descenso según se aumenta potencia o tiempo. Estos dos índices son los que definen mejor la evolución de esta muestra en tanto en cuanto son los que expresan la luminosidad del color y su grado de enrojecimiento. De tal manera, el aumento del parámetro  $a^*$  con respecto a la muestra de partida es indicativo del enrojecimiento. La posterior disminución progresiva del parámetro  $a^*$  con el aumento de la potencia refleja el paso de tonos rojizos más intensos a menos intensos que se observa *de visu* en las muestras.

**Tabla 10.1:** Medidas de color en muestras de Uncastillo. (a partir de 10 medidas para la muestra sin irradiar y 5 medidas para cada una de las potencias)

3 minutos					
	L*	a*	b*	WI	YI
Sin irradiar	64,4 ± 0,6	2,6 ± 0,1	13,9 ± 0,6	-4,0 ± 1,0	28,0 ± 1,0
100 W (11,3 kW/m <sup>2</sup> )	58,8 ± 0,9	7,3 ± 0,3	12,9 ± 0,6	-3,0 ± 1,0	28,0 ± 1,0
125 W (14,1 kW/m <sup>2</sup> )	59,0 ± 0,7	6,7 ± 0,5	12,3 ± 0,4	-2,0 ± 1,0	26,8 ± 0,9
150 W (16,9 kW/m <sup>2</sup> )	62,8 ± 0,7	5,5 ± 0,3	11,4 ± 0,6	1,0 ± 1,0	24,0 ± 1,0

5 minutos					
	L*	a*	b*	WI	YI
Sin irradiar	64,4 ± 0,6	2,6 ± 0,1	13,9 ± 0,6	-4,0 ± 1,0	28,0 ± 1,0
100 W (11,3 kW/m <sup>2</sup> )	60,0 ± 2,0	7,0 ± 1,0	13,4 ± 0,8	-4,0 ± 2,0	29,0 ± 1,0
125 W (14,1 kW/m <sup>2</sup> )	60,0 ± 2,0	5,9 ± 0,4	11,5 ± 0,9	0,0 ± 2,0	25,0 ± 2,0
150 W (16,9 kW/m <sup>2</sup> )	62,0 ± 1,0	5,7 ± 0,4	12,2 ± 0,4	-1,0 ± 1,0	25,5 ± 0,9

Las tendencias son más difíciles de ver en los resultados para la arenisca de Villamayor ya que presenta de partida un color más heterogéneo (debido fundamentalmente a diferencias puntuales en el contenido en hierro), lo que condiciona fuertemente la acción de la temperatura en términos de color. Observando la figura 10.11, anteriormente presentada, se observa con claridad esta evolución heterogénea del color. No obstante, los datos presentados en la tabla 10.2 reflejan la evolución que se observa de visu donde tras un descenso importante de la luminosidad y un aumento de a\*, que son reflejo del enrojecimiento, los valores de L\* descienden mientras que ascienden los de a\*. Esto concuerda con lo observado en los experimentos en los que el color rojo se oscurece cada vez más.

**Tabla 10.2:** Medidas de color en muestras de Villamayor (a partir de 10 medidas para la muestra sin irradiar y 5 medidas para cada una de las potencias).

3 minutos					
	L*	a*	b*	WI	YI
Sin irradiar	72,0 ± 2,0	3,7 ± 0,8	18,0 ± 2,0	-11,0 ± 7,0	31,0 ± 4,0
100 W (11,3 kW/m <sup>2</sup> )	66,0 ± 3,0	8,0 ± 2,0	15,0 ± 2,0	-5,0 ± 6,0	29,0 ± 4,0
125 W (14,1 kW/m <sup>2</sup> )	66,0 ± 1,5	8,7 ± 1,0	15,5 ± 0,7	-8,0 ± 2,0	30,0 ± 2,0
150 W (16,9 kW/m <sup>2</sup> )	61,6 ± 1,4	11,9 ± 1,0	18,0 ± 1,0	-13,0 ± 2,0	36,0 ± 2,0

5 minutos					
	L*	a*	b*	WI	YI
Sin irradiar	72,0 ± 2,0	3,7 ± 0,8	18,0 ± 2,0	-11,0 ± 7,0	31,0 ± 4,0
100 W (11,3 kW/m <sup>2</sup> )	60,0 ± 2,0	8,0 ± 1,0	17,0 ± 0,5	-11,6 ± 0,9	35,0 ± 0,7
125 W (14,1 kW/m <sup>2</sup> )	63,0 ± 2,0	11,0 ± 1,0	17,6 ± 0,7	-13,0 ± 2,0	35,0 ± 2,0
150 W (16,9 kW/m <sup>2</sup> )	64,0 ± 3,0	11,0 ± 3,0	18,0 ± 3,0	-13,0 ± 8,0	35,0 ± 7,0

Con respecto a la rugosidad de las muestras de Uncastillo, se seleccionaron tres parámetros: **Ra**, que es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones desde la línea media del perfil; **Rq**, que es la raíz cuadrada de la media aritmética al cuadrado de las desviaciones de la línea base del perfil; **Rz**, que es la suma de las medias de los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos del perfil. Se observa que el proceso de quemado provoca un aumento de la rugosidad superficial. Sin embargo la dispersión de los resultados obtenidos, que se recogen en la tabla 10.3. no permiten extraer una pauta clara de evolución de la rugosidad con la potencia.

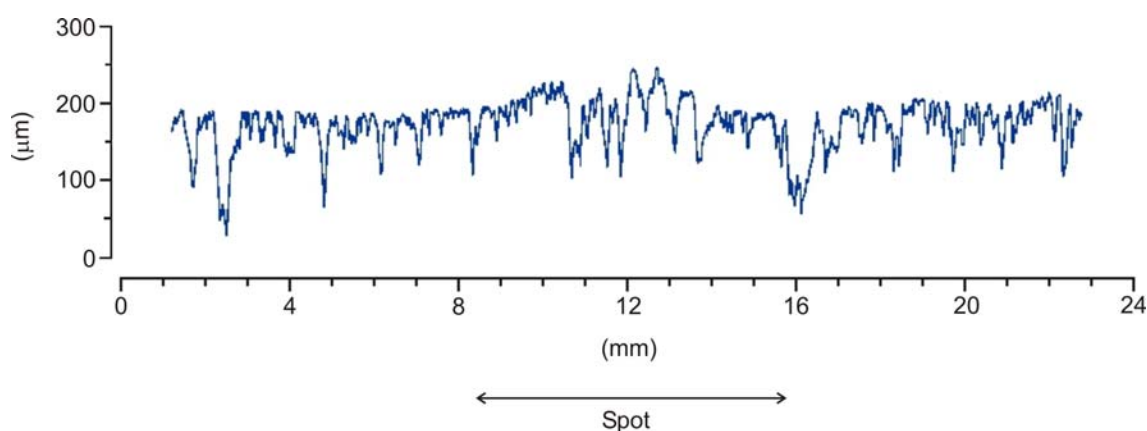
**Tabla 10.3:** Medidas de rugosidad en la superficie de muestras de Uncastillo (a partir de 10 medidas para la muestra sin irradiar y 3 medidas para cada una de las potencias).

3 minutos			
	Ra	Rq	Rz
Sin irradiar	$17 \pm 2$	$21 \pm 2$	$66 \pm 6$
100 W ( $11,3 \text{ kW/m}^2$ )	$22 \pm 2$	$27 \pm 2$	$81 \pm 6$
125 W ( $14,1 \text{ kW/m}^2$ )	$19 \pm 3$	$23 \pm 3$	$62 \pm 1$
150 W ( $16,9 \text{ kW/m}^2$ )	$19 \pm 2$	$24 \pm 2$	$72 \pm 6$

5 minutos			
	Ra	Rq	Rz
Sin irradiar	$17 \pm 2$	$21 \pm 2$	$66 \pm 6$
100 W ( $11,3 \text{ kW/m}^2$ )	$16 \pm 1$	$20 \pm 2$	$62 \pm 1$
125 W ( $14,1 \text{ kW/m}^2$ )	$18 \pm 1$	$24 \pm 2$	$77 \pm 7$
150 W ( $16,9 \text{ kW/m}^2$ )	$18 \pm 2$	$24 \pm 3$	$72 \pm 9$

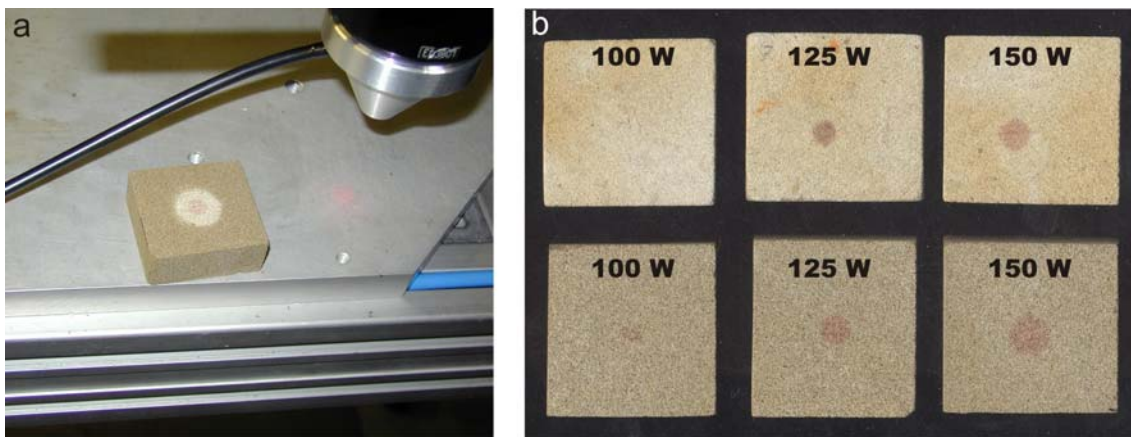
La figura 10.14 recoge un perfil de una de las muestras de arenisca de Uncastillo. La zona calentada por el láser adquiere un relieve positivo con respecto al resto de la muestra y la rugosidad aumenta, especialmente en la zona central, lo que otorga al perfil una morfología tipo “atolón”.



**Figura 10.14:** Perfil de la superficie de la arenisca de Uncastillo quemada con láser durante 5 minutos a 150 W. En la zona adyacente al spot.

No se pudieron realizar medidas de las muestras de Villamayor debido a que sus niveles tanto iniciales como finales de rugosidad excedían el rango de funcionamiento del instrumento.

Con respecto a los ensayos preliminares con muestras saturadas en agua (48 h.), se esperaba que la humedad provocara efectos mecánicos macroscópicos importantes. Sin embargo solo se observó que la velocidad de calentamiento, así como la temperatura máxima alcanzada descendía aproximadamente en un 25 % pero no se observó ningún tipo de fracturación que indicara que la humedad facilite la rotura del material.

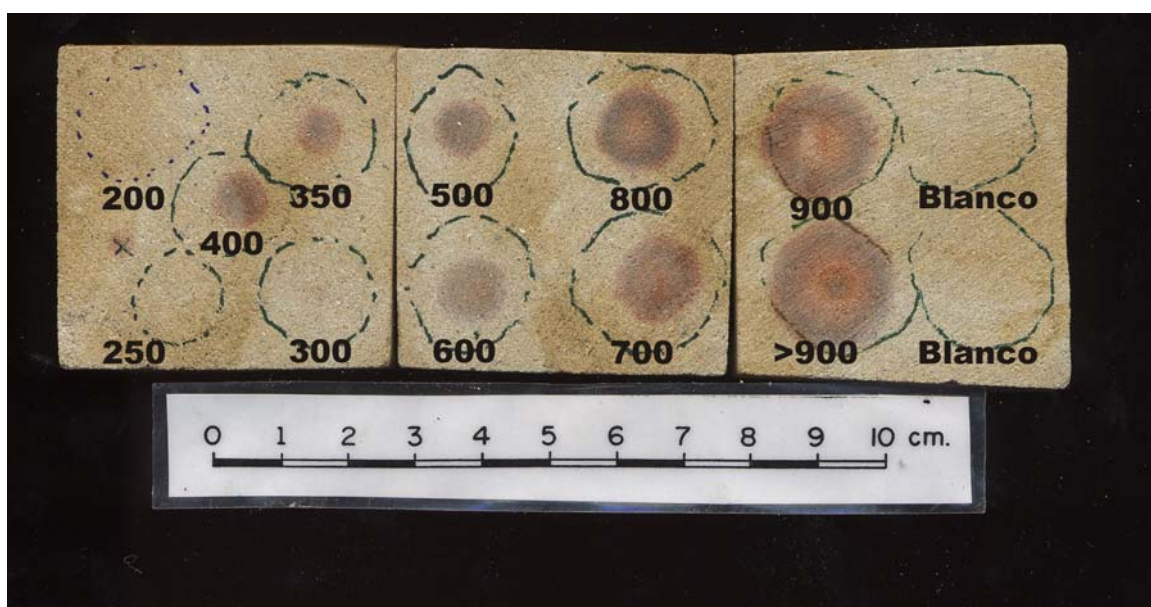


**Figura 10.15:** Muestra de Uncastillo húmeda justo tras el calentamiento con láser (a) y resultado de los ensayos con diferentes potencias (b) para la Arenisca de Villamayor (arriba) y de Uncastillo (abajo).

## 10.6. Evolución de los materiales con la temperatura.

Una vez conocidos los parámetros idóneos para el ensayo con láser de este tipo de muestras, se realizó la segunda serie de experimentos en la cual el parámetro de control fue la temperatura máxima alcanzada por el material. Para ello se ensayaron los dos materiales previamente descritos a temperaturas múltiplos de 100 °C desde 200 hasta aproximadamente 1000 °C. En las muestras de arenisca de Villamayor se introdujeron dos puntos adicionales a 250 y 350 °C para densificar el muestreo a temperaturas donde los minerales de la arcilla pueden presentar mayor número de variaciones.

Los dos materiales seleccionados, además de su interés histórico, son bastante representativos pues ejemplarizan dos tipos composicionales de areniscas cuyos comportamientos eran previsiblemente bastante distintivos. Por un lado la Arenisca de Villamayor, más silíceá, con una matriz rica en minerales de la arcilla y por otro lado la arenisca de Uncastillo con una matriz fundamentalmente carbonática. La figura 10.16 y 10.17 recoge las muestras ensayadas para cada una de las temperaturas seleccionadas. Valga llamar la atención el bajo volumen relativo de muestra utilizada en los ensayos, especialmente en el caso de la arenisca de Uncastillo donde ambas imágenes corresponden de hecho a las dos caras del mismo espécimen.



**Figura 10.16:** Resultado de los ensayos a diferentes temperaturas (°C) para la Arenisca de Villamayor.

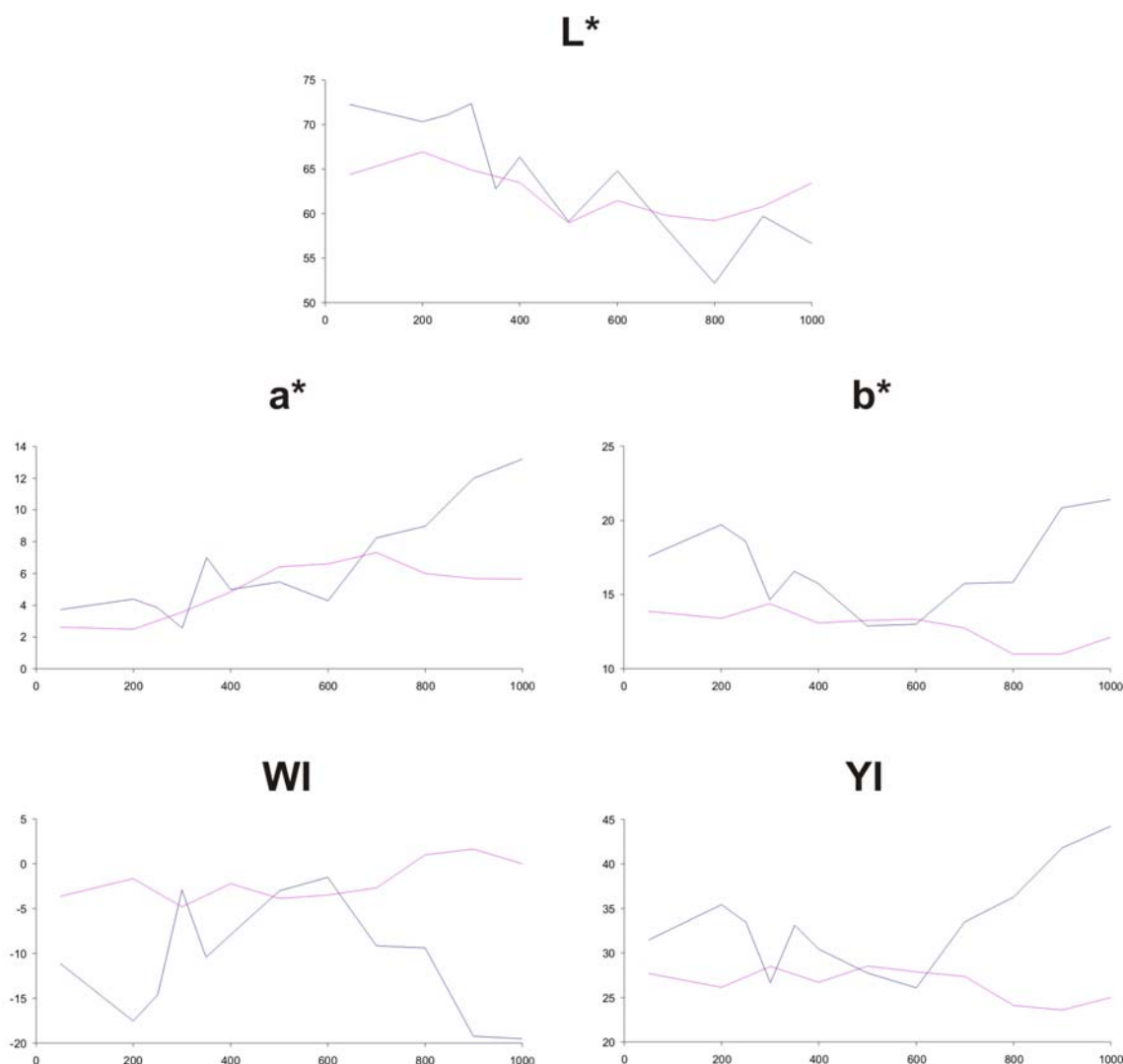
Lo primero que llama la atención es el cambio progresivo de color que comienza a notarse de forma leve cuando la temperatura superficial alcanzada es de 300 °C. La figura 10.18 representa la evolución cromática de las muestras con la temperatura. Los resultados más claros se observan en la arenisca de Uncastillo, puesto que en la arenisca de Villamayor, como se ha comentado anteriormente, el color inicial parcheado debido a la distribución heterogénea del hierro produce una mayor dispersión de los datos.



**Figura 10.17:** Resultado de los ensayos a diferentes temperaturas (°C) para la Arenisca de Uncastillo.

La evolución de la luminosidad en la arenisca de Villamayor sigue una pauta descendente para todo el rango de temperaturas desde 300 °C, mientras que en la Piedra de Uncastillo se observa como tras el descenso inicial, la luminosidad comienza a aumentar a partir de 800 °C, lo que se relaciona con la aparición de una mancha blancuzca en el centro del spot a partir de esa temperatura.





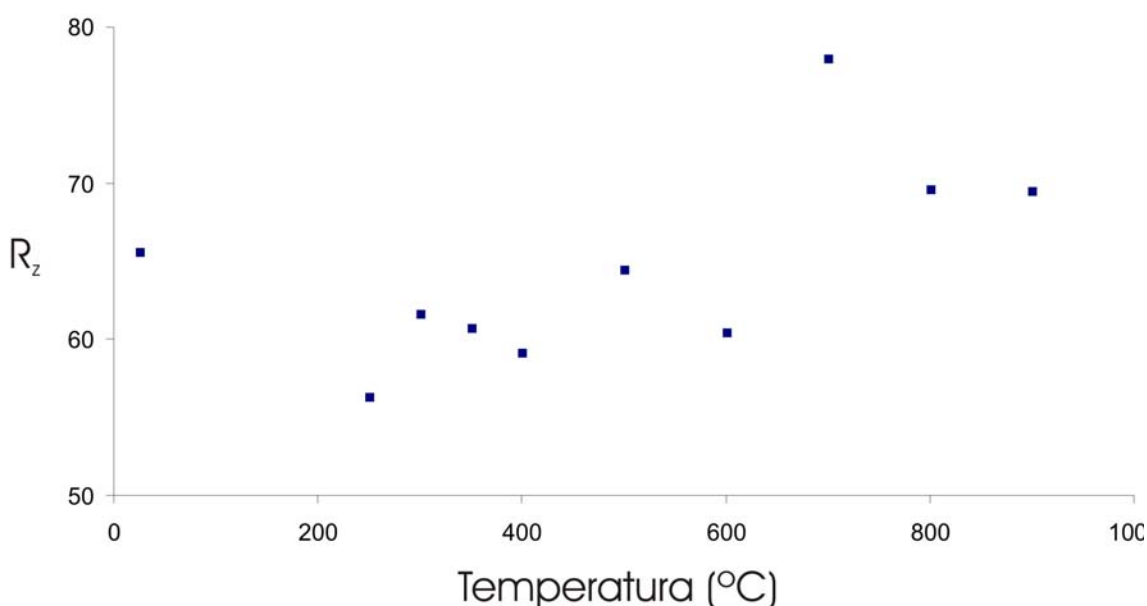
**Figura 10.18:** Graficas de evolución de los parámetros cromáticos: Luminosidad ( $L^*$ ),  $a^*$  y  $b^*$  (CIE, 1986), e índices de blanco (WI) y amarillo (YI) (ASTM, 2000) con la temperatura de arenisca de Villamayor (azul) y arenisca de Uncastillo (rojo).

El parámetro  $a^*$  muestra inicialmente una pauta ascendente en ambas muestras como corresponde al enrojecimiento del material, aunque en la Piedra de Uncastillo esa tendencia se invierte en las temperaturas mayores, otra vez debido al segundo cambio de color que este material presenta a partir de 800 °C. En el resto de parámetros se observa de manera general que en ambos materiales existen dos puntos de inflexión en el comportamiento. En la Arenisca de Villamayor esto se produce a partir de 600 °C, cuando, como se observa en las fotografías de la figura 10.16, se comienza a producir un anillo interior de coloración anaranjada, frente al color “amoratado” de las temperaturas más bajas y zonas externas de las temperaturas mayores. En la Piedra de

Uncastillo la inflexión se sitúa en los 800 °C debido a la aparición de zonas blanquecinas.

Estas zonas blanquecinas adquieren pasadas unas 24 horas desde los ensayos un relieve positivo observable a simple vista que a su vez presenta mayor grado de humedad que la zonas más rojiza y sana circundante. Así mientras que la zona externa presenta un grado de humedad de 8,8 % las zonas más internas y blancuzcas contienen un 9,4 %.

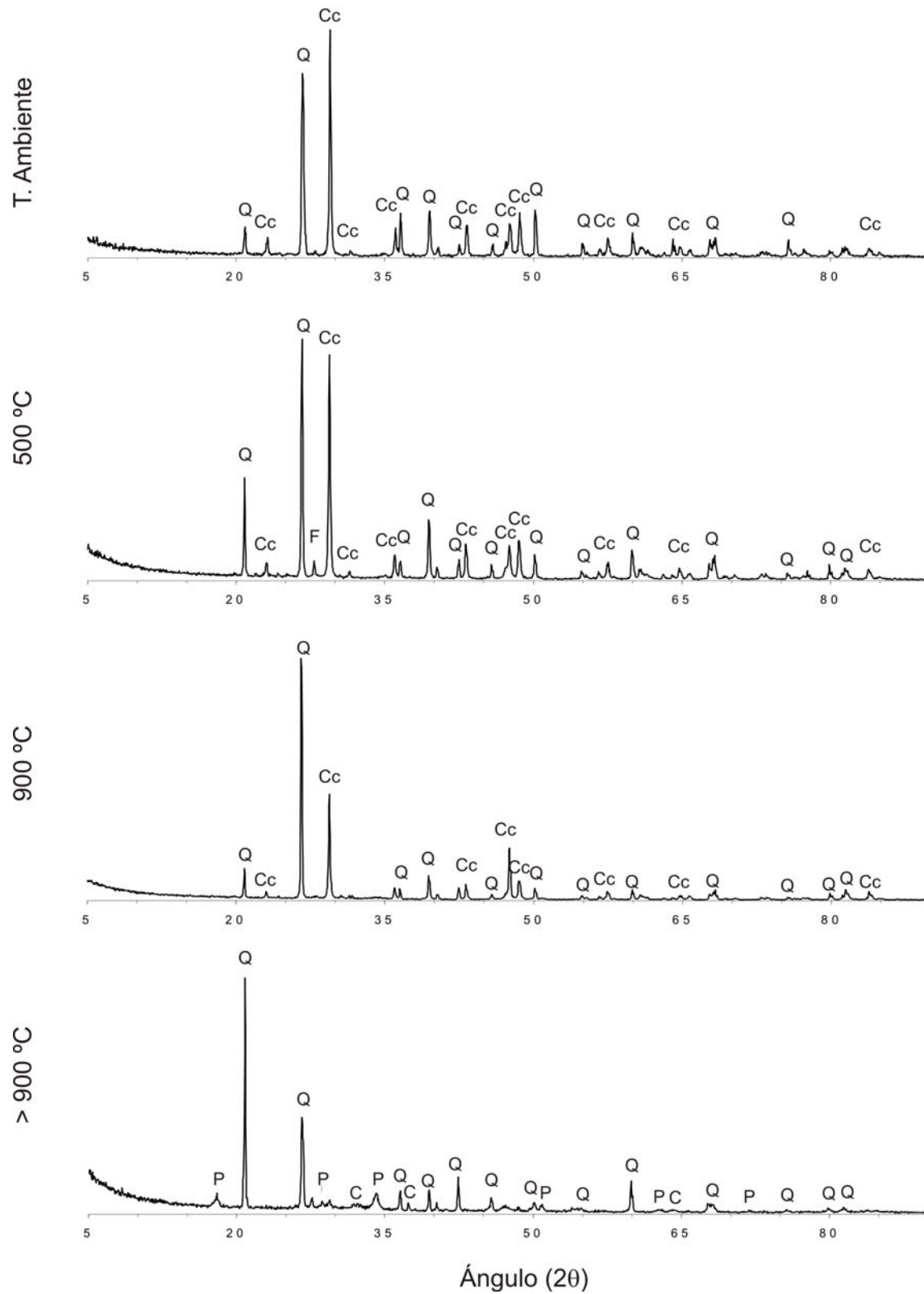
Con respecto a la rugosidad, la figura 10.19 muestra los resultados obtenidos para la piedra de Uncastillo. Como se indicó anteriormente el nivel de rugosidad de la arenisca de Villamayor impedía medidas de rugosidad con el equipamiento disponible. Se escogió el parámetro  $R_z$  (Suma de las medias de los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos del perfil) por ser el que presentaba menor dispersión y mostraba más claramente la evolución de la muestra. Se observa una relación directamente proporcional entre la rugosidad y la temperatura alcanzada.



**Figura 10.19:** Evolución del parámetro de rugosidad  $R_z$  con la temperatura para la Piedra de Uncastillo.

La figura 10.20 muestra algunos de los diagramas de difracción de rayos X con portamuestras orientado de la Piedra de Uncastillo donde se muestra la evolución mineralógica de la muestra durante el quemado.





**Figura 10.20:** Evolución mineralógica en la Piedra de Uncastillo durante el quemado. Cuarzo (Q), Calcita (Cc), Feldespato potásico (F), Portlandita (P) y Oxido de calcio (C).

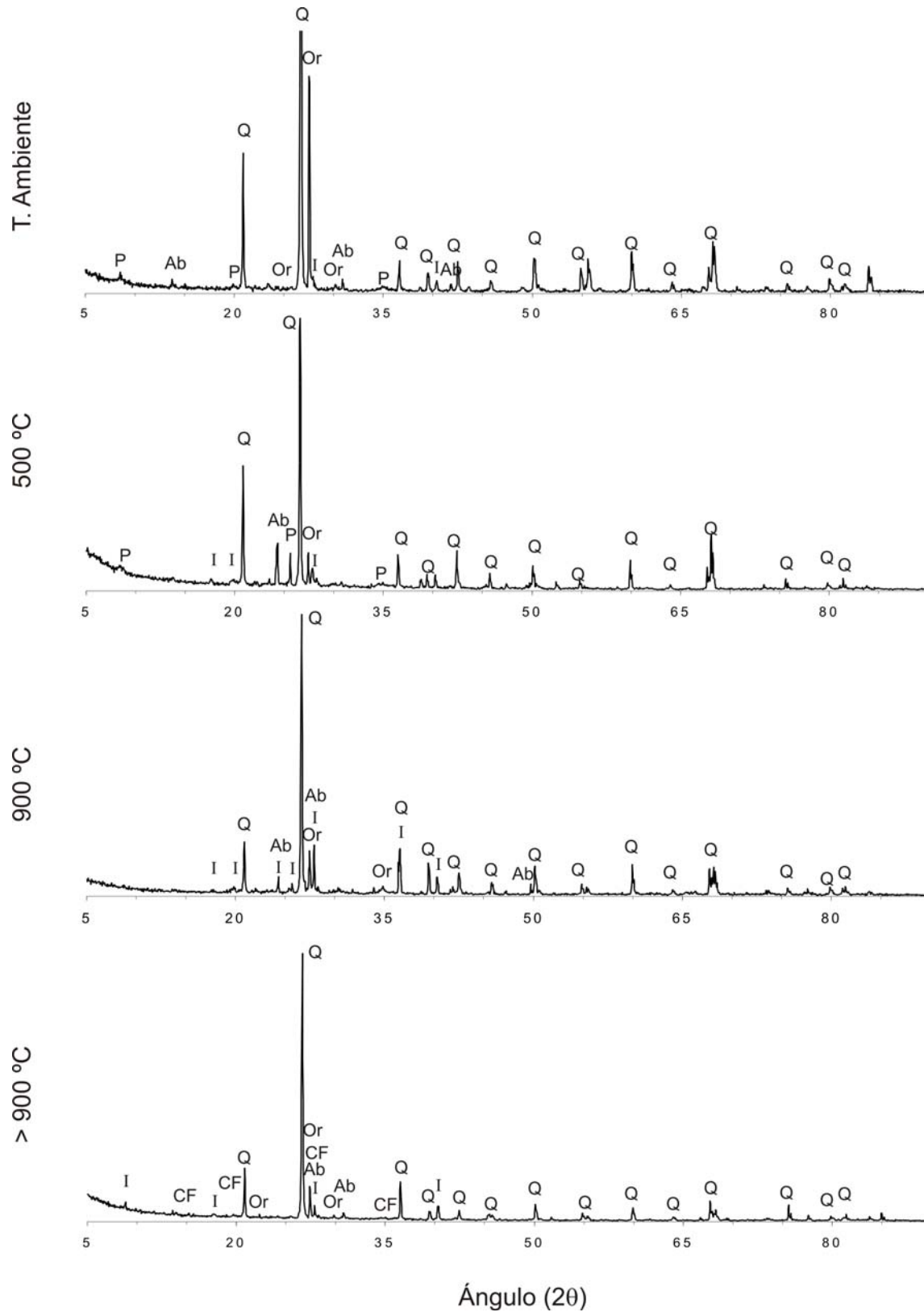
La variación mineralógica más notable está relacionada con la descomposición de la calcita que sufre un proceso de calcinación. A 800 °C comienza a disminuir notablemente la proporción relativa de calcita y a aparecer pequeños picos de óxido de calcio, desapareciendo por completo la calcita a temperaturas cercanas a 1000 °C. El producto inicial de la calcinación es el óxido de calcio (cal), sin embargo a medida que la cantidad de CaO aumenta por encima de 900 °C también aparece Portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , debido a la reacción del óxido de calcio con la humedad atmosférica. Esta reacción supone un aumento de volumen medio de un 20 % (Hajpál y Török, 2004) y es la principal causa de la disgregación granular que se observa en las muestras calentadas por encima de 1000 °C tras unos días de exposición a la humedad ambiental.

En la Arenisca de Villamayor (figura 10.21), los cambios predominantes se detectan en las arcillas de la matriz. Principalmente la paligorskita varía su estructura lo que se traduce en pequeñas diferencias en la intensidad de las reflexiones a 10.5, 4.5, 3.68 y 3.23 Å debido a procesos de deshidratación y deshidroxilación (Hayashi, 1969; VanScoyoc et al., 1979). Hasta 500 °C los procesos de pérdida de agua y grupos hidroxilos son parcialmente reversibles, por lo que se sigue observando paligorskita aunque con su estructura dañada, lo que se refleja en la variación de la intensidad de las reflexiones y en pequeñas derivas del espaciado para las reflexiones citadas. A partir de 500 °C la paligorskita colapsa completamente y se deja de observar en los difractogramas.

A lo largo de todo el calentamiento se observan pequeñas variaciones en las relaciones de los espaciados de los feldespatos, principalmente en la albita, lo que indica que este mineral está sufriendo procesos de cambio de orden a pequeña escala, posiblemente por la formación de pequeñas exoluciones, sin embargo las técnicas analíticas aplicadas no son suficientes para concretar más estos procesos.

Por encima de 900 °C aparecen pequeños picos de compuestos que aparecen citados en las tablas de difracción como escorias silicoaluminosas y compuestos carbonosos inorgánicos. Esto indica que a partir de estas temperaturas comienzan a existir procesos de fusión parcial de los componentes de la arenisca.

En ambos materiales los límites en los que se producen cambios composicionales se correlacionan muy bien con los cambios anteriormente observados en la evolución del color.



**Figura 10.21:** Evolución mineralógica en la Arenisca de Villamayor durante el quemado. Cuarzo (Q), Albita (Ab), Ortosa (Or), Illita (I), Paligorskita (P) y residuos carbonosos y de fusión (CF).

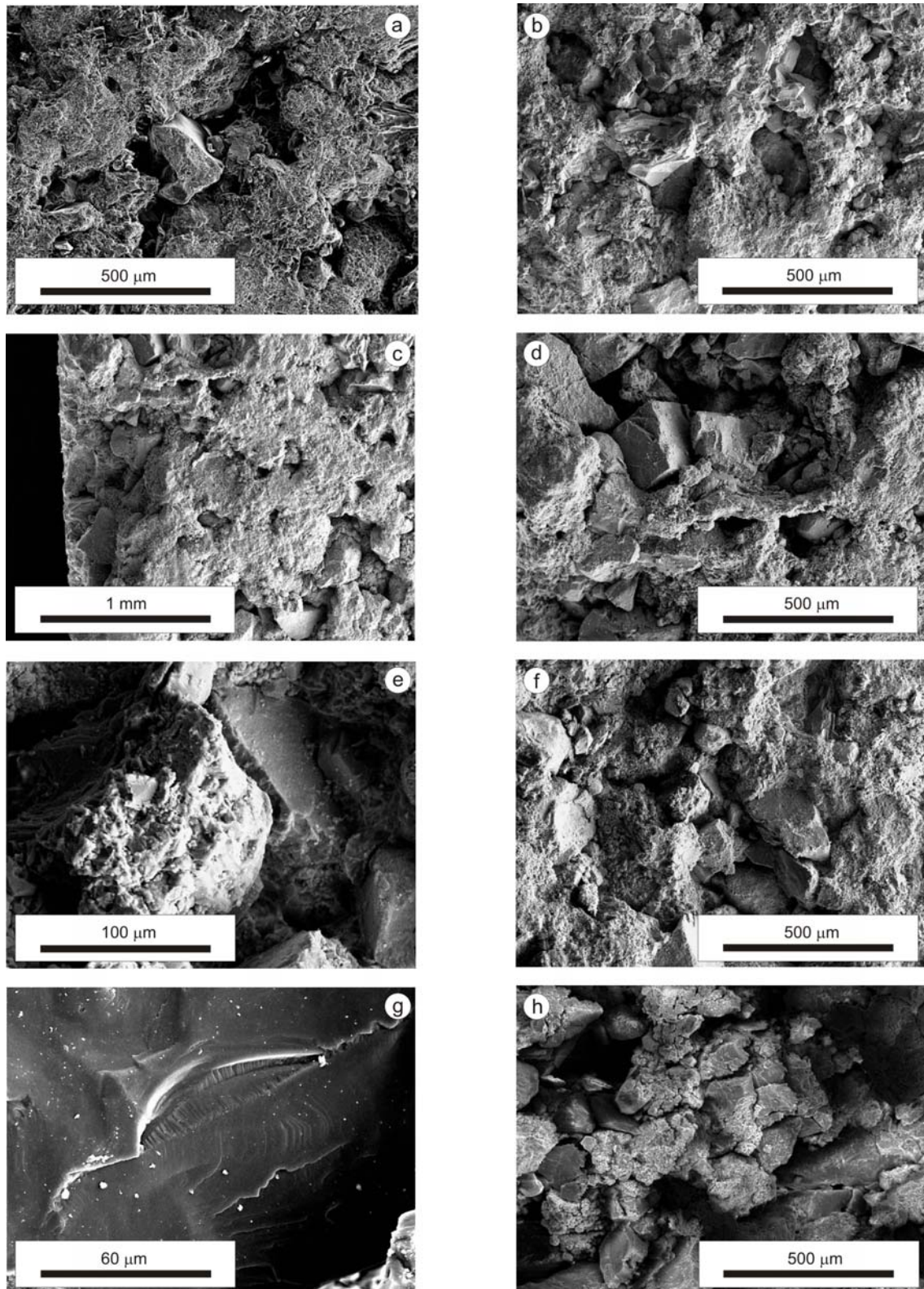
En cuanto a las relación hierro ferroso y férrico, la tabla 10.4 recoge los análisis de las zonas quemadas de tres de las muestras ensayadas. Los porcentajes individuales de hierro férrico y ferroso varían debido a la heterogeneidad de las muestra, por lo que resulta más adecuado analizar la relación entre ambos cationes, lo que nos indica el grado de oxidación de las muestras. Los análisis indican que, a medida que aumenta la temperatura, se produce una aumento relativo de la concentración de hierro férrico con respecto al hierro ferroso. Esto es debido a la oxidación térmica del hierro por encima de 250-300 °C que produce la coloración rojiza de las muestras.

**Tabla 10.4:** Contenidos porcentuales de hierro ferroso y férrico y ratio férrico/ferroso que indica el grado de oxidación de las muestras.

	Villamayor			Uncastillo		
	FeO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	FeO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
Sana	0,32	1,20	3,75	0,40	0,78	1,95
500 °C	0,39	1,52	3,90	0,28	0,92	3,29
900 °C	0,26	1,40	5,38	0,27	1,01	3,74

Las observaciones de microscopía electrónica de las areniscas de Uncastillo ilustran el proceso descrito anteriormente. Las figuras 10.22a y b corresponden a una muestra sin quemar en la que se observan los granos minerales embutidos en una abundante matriz calcárea. Las figuras 10.22c y d corresponden a la muestra calentada hasta 700 °C. No se observan cambios importantes en la arenisca, aunque se observa que se han perdido fragmentos de la matriz calcárea (la figura 10.22c es un corte donde la parte izquierda es la zona donde impactó el láser) y algunos cristales muestran un aumento apreciable de la rugosidad (10.22d). Las imágenes 10.22e y f corresponden a un calentamiento de 900 °C y en ellas se observa un aumento de frecuencia en la aparición de granos fracturados en superficie (10.22f) mientras que las modificaciones en la matriz son notables (10.22f). La matriz calcárea aparece muy reducida, observándose en superficie cada vez mayor proporción de granos y menor de matriz. A más de 900 °C (10.22g y h) un gran número de granos del esqueleto, especialmente los de cuarzo, presentan diversas tipologías de fracturas intragranulares (10.22h). En lo que se refiere al proceso de calcinación este es muy importante. Los granos aparecen desagregados, habiéndose perdido la matriz calcárea que se ha convertido completamente en CaO. El alto brillo de la imagen (10.22h) es consecuencia de la continua captación de humedad

por la muestra debido a la reacción del  $\text{CaO}$  con el agua atmosférica para formar Portlandita que aparece como pequeños cristales en el seno de la masa de  $\text{CaO}$ .

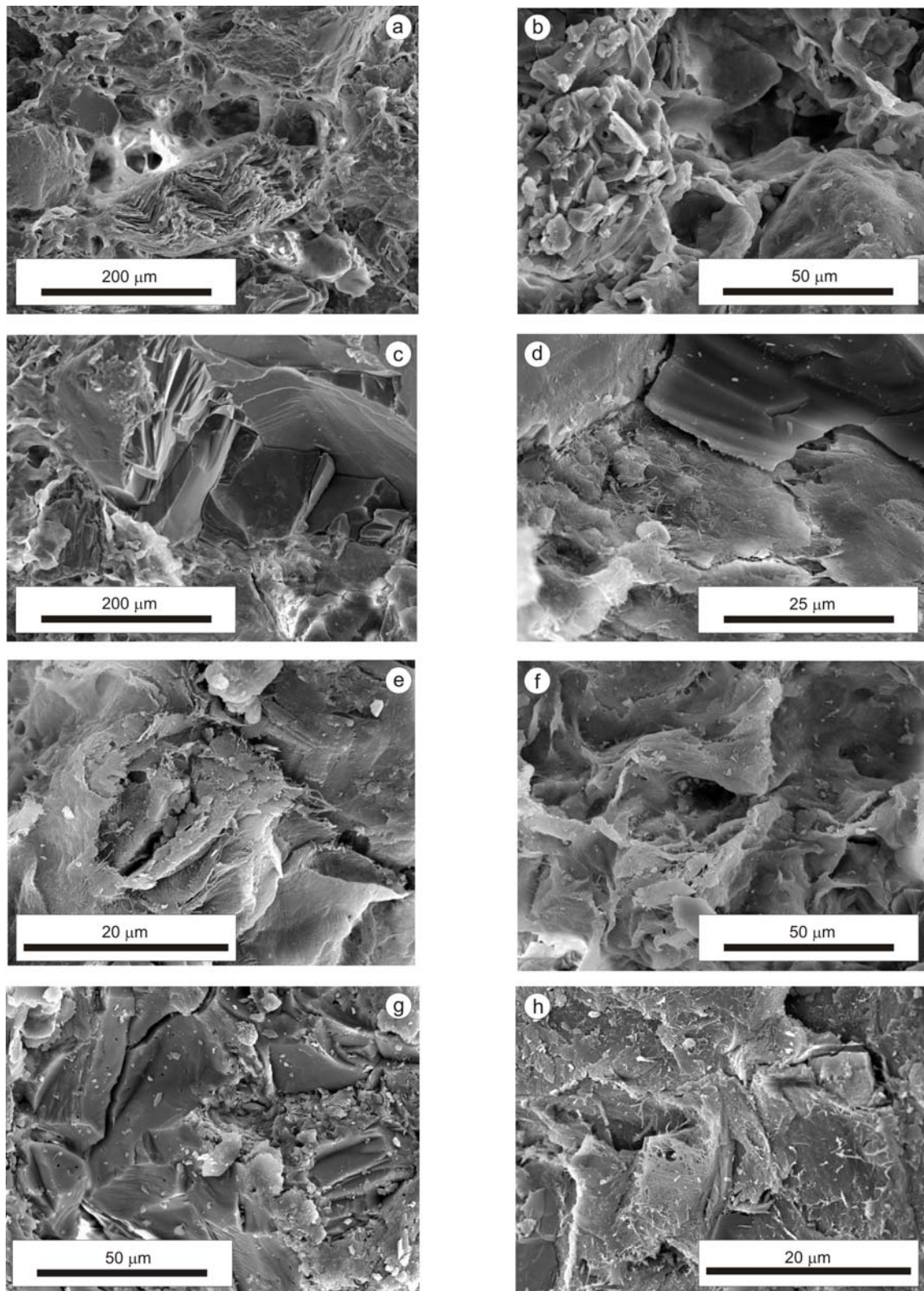


**Figura 10.22:** Imágenes SEM-SE de la Piedra de Uncastillo a diferentes temperaturas de quemado. Ver detalles en el texto.

La figura 10.23 recoge las imágenes de microscopio electrónico de la arenisca de Villamayor. Las fotomicrografías 10.23a y b muestran el material sin haber recibido ningún proceso de quemado. En ellas destaca la presencia de paligorskita como una red densa de filamentos que aparecen en los poros. Con el inicio del proceso de quemado, aun a no muy altas temperaturas (las figuras 10.23c y d están tomadas en las muestras quemadas a 300 °C) se observa por un lado el proceso de fracturación de los granos del esqueleto en forma de fisuras intragranulares perpendiculares a las uniones intergranulares (10.23c). La paligorskita comienza a sufrir un proceso de desentramado de la red de fibras. Las fibras de paligorskita sufren una torsión debida a la deshidratación que produce que exista una rotación sobre el eje que forman los enlaces Si-O-Si que unen las fibras a longitudinalmente.

Este proceso continúa a medida que va aumentando la temperaturas, a la vez que va colapsando la estructura de la paligorskita. Hasta 500 °C solo se observa la desagregación de los filamentos que confiere a la masa de paligorskita un aspecto deshilachado. Por encima de 500 °C la estructura de la paligorskita comienza a colapsar, y este colapso se ve reflejado en la pérdida de longitud de los filamentos, que comienzan a aparecer como secciones cortas en vez de los filamentos largos que unían los cristales. A 900 °C (imágenes 10.23e y f) es evidente la disrupción textural de la paligorskita que es reflejo de las rotaciones y procesos de colapso debidos a la deshidratación y deshidroxilación completa de este mineral. Por encima de 900 °C (fotomicrografías g y h) se ha perdido completamente cualquier textura de la paligorskita (10.23g y h, aunque más notable en 10.23h). En los granos de esqueleto (figura 10.23g) muchos de los granos presentan una fracturación completa aparte de la desaparición de pequeños fragmentos de los mismos por el salto de esquirlas, que en la imagen se detectan como “huellas de hacha” debidas a la fractura concoidea, principalmente de los granos de cuarzo. En los granos del esqueleto también comienzan a aparecer pequeñas huellas superficiales en forma de pequeños agujeros de corrosión debidos a pequeños procesos de fusión en la superficie





**Figura 10.23:** Imágenes SEM-SE de la Arenisca de Villamayor a diferentes temperaturas de quemado. Ver detalles en el texto.

Los resultados sobre la validez del uso de técnicas láser para la modelización de condiciones de incendios en materiales pétreos de construcción son muy positivos. El láser presenta la ventaja de la poca muestra que se necesita para realizar los ensayos, y un control muy exhaustivo de los parámetros experimentales, lo que garantiza una alta repetibilidad de los ensayos.

Con respecto a las muestras ensayadas en el conjunto de este estudio preliminar, se observa que las areniscas no sufren daños mecánicos macroscópicos importantes ante un fuego, siendo los principales efectos de carácter químico y relacionados con la composición de la matriz. El cambio de color, el aumento de relieve y de humedad, junto con los datos de difracción y las observaciones microscópicas permiten caracterizar que a partir de 800 °C se ha comenzado a producir el proceso de calcinación de la calcita que forma la matriz y parte del esqueleto de la piedra de Uncastillo. Aunque no es hasta temperaturas cercanas a 1000 °C cuando esto se refleja en una disgregación granular apreciable a simple vista en un periodo corto de tiempo.

La arenisca de matriz silicatada presenta aun mayor resistencia a los cambios mecánicos macroscópicos, sin que se observe ningún proceso de deterioro mecánico a corto plazo a escala de muestra. Por el contrario, a escala microscópica, el deterioro que sufre la matriz de esta arenisca se produce a temperaturas menores que en las areniscas con matriz carbonatada, produciéndose cambios estructurales en los minerales de la arcilla a partir de 250 °C hasta por encima de los 500 °C en que la estructura de la paligorskita colapsa completamente. Cerca de los 1000 °C comienzan a producirse procesos de fusión parcial en la superficie de los granos silicatados.

Ambos materiales sufren un proceso de termo-oxidación del hierro que se comienza a expresar en un cambio de coloración desde una temperatura en el intervalo 250-300 °C. La humedad inicial de la muestra no parece contribuir a que exista mayor deterioro mecánico, como en algunos casos se ha citado, aunque permanece la cuestión del efecto que tendría el rociado con agua estando la muestra caliente.

Todos estos cambios microscópicos, aunque no encuentren una expresión en el deterioro macroscópico pueden tener influencia en la evolución futura del material, por lo que es importante contrastar estos estudios con lo que se observa en edificios reales.



## **11. Efectos del fuego en materiales pétreos de edificios históricos.**

Como complemento al estudio anterior realizado sobre el efecto simulado del fuego de manera experimental en el laboratorio, este capítulo recoge el estudio de diferentes casos reales que no abarcan solo areniscas sino también materiales ígneos y carbonáticos. Como se ha referido en el capítulo introductorio de la presente tesis, el fuego se ha considerado clásicamente como un importante agente de deterioro de las rocas en ambientes naturales. Ya en 1926, Blackwelder mencionaba los fuegos forestales como un factor importante generador de desplazados en afloramientos rocosos. Como en el caso de la meteorización por insolación, el concepto inicialmente geomorfológico se aplicó al deterioro de los edificios construidos en piedra, considerándose como un importante agente de deterioro de los materiales pétreos de construcción (Winkler, 1997), especialmente ya que es capaz de producir efectos notables en pocos minutos (Allison y Goudie, 1994). El fuego es una de las causas de deterioro de los edificios patrimoniales más importantes y, por ejemplo en el contexto de la Unión Europea, se estima que se pierde alrededor de un edificio histórico cada día a causa del fuego (COST C17, 2001).

Los efectos del fuego dependen de manera muy importante del tipo de roca en términos de su comportamiento reológico. Después de un fuego se observan dos tipos de comportamientos en los materiales pétreos de construcción: Los edificios construidos con materiales competentes, tales como rocas ígneas, presentan principalmente formas de deterioro mecánico como fisuración (a diversas escalas), desplazados, etc. Por otro lado, los edificios construidos con materiales granulares friables (como por ejemplo algunas areniscas) no presentan un deterioro mecánico singenético tan intenso como los materiales más tenaces.

De tal manera, incluso desde la observación directa *in situ*, los materiales pétreos de construcción se pueden separar en dos grandes grupos con respecto a su comportamiento ante el fuego:

- Materiales competentes o “densos”, tales como rocas ígneas, rocas carbonáticas densas o areniscas muy cementadas (p.ej. cuarzoarenitas), donde

la modificación estructural de la roca debido a la creación de fisuras es el proceso de deterioro mecánico predominante.

- Materiales friables, tales como la mayoría de rocas sedimentarias detríticas, compuestas por un esqueleto clástico y una matriz que actúa absorbiendo los efectos dinámicos de la dilatación producida por el fuego, donde los efectos del fuego se concentran en cambios mineralógicos en la matriz.

La metodología utilizada para el estudio de los efectos del fuego ha de variar, de esta forma, con el tipo de roca estudiada. Así, en el caso de materiales competentes, las técnicas petrofísicas y de observación directa como Velocidad de ultrasonidos, Espectrofotometría, Porosimetría de mercurio, Microscopía de polarización, Microscopía electrónica de barrido (SEM), Microscopía de fluorescencia o Análisis numérico de imágenes, son las más adecuadas. Para materiales friables, en los cuales se deben detectar además cambios mineralógicos, se han de utilizar además de las anteriores, técnicas de caracterización físico-mineralógicas (SEM con análisis de rayos X dispersivos, Difracción de rayos X, Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier, Análisis térmico diferencial o Análisis químico).

En este capítulo se estudian las formas de deterioro y transformaciones físicoquímicas producidas a causa de incendios en una serie de edificios patrimoniales contruidos con diferentes tipos de materiales pétreos, que incluyen areniscas, granitos y dolomías, para determinar el impacto producido por un fuego real en los mismos.

### **11.1. Efectos del fuego en materiales detríticos friables.**

El estudio abarcado en este apartado complementa lo desarrollado en el capítulo anterior, ya que se seleccionaron edificios contruidos con los dos tipos de areniscas utilizados para la simulación de incendios en laboratorio: Arenisca calcárea de Uncastillo y Arenisca de matriz silicatada de Villamayor. Estos tipos se seleccionaron como representativos de dos tipos bien diferenciados de matriz, calcárea y silícea. Se seleccionaron diferentes edificios históricos en el término municipal de Uncastillo (Zaragoza), y la llamada “Torre de las Campanas” de la Catedral Nueva de Salamanca.

La arenisca de Uncastillo es parte muy importante del patrimonio arquitectónico en todo el entorno de la comarca de las “cinco villas” en el noroeste de la provincia de Zaragoza. La mayoría del patrimonio arquitectónico de este área está construido desde tiempos romanos con este tipo de piedra. El conjunto arqueológico de *Los Bañales* (siglos I-II), el castillo de Uncastillo del siglo XI o diferentes iglesias románicas del siglo XII (Santa María, San Martín, San Miguel) son algunos ejemplos de edificios emblemáticos construidos con este material. A esto hay que añadir que prácticamente todo el patrimonio rural utiliza este material en su construcción.

La Arenisca de Villamayor es un material constante en la historia constructiva de la ciudad de Salamanca y son innumerables los edificios patrimoniales en la ciudad construidos con este tipo de material como el conjunto de las catedrales *Vieja y Nueva* (siglos XII-XIII y XVI-XVII respectivamente) o la *Casa de las Conchas* (siglos XV-XVI) por citar solo dos ejemplos emblemáticos.



**Figura 11.1:** Vista general de las zonas estudiadas de las Termas Romanas de Los Bañales (a) y de la Iglesia de San Martín (b). En ambas imágenes se observan áreas rojizas, afectadas por el fuego, junto a zonas de piedra sin afectar.

En la zona de Uncastillo, las observaciones *in situ* se realizaron en las Termas Romanas de Los Bañales (figura 11.1a) dentro del término de la cercana población de Sádaba, en las cuales los daños producidos por el fuego se relacionan de forma inherente con el uso del edificio y en la Iglesia de San Martín (S. XII), convertida actualmente en museo (figura 11.1b), y en la que los daños se corresponden a fuegos vandálicos. En estos edificios se tomaron muestras de pequeños fragmentos a punto de desprenderse. Sin embargo se seleccionó un tercer edificio rural para hacer un muestreo más extensivo una vez que se comprobó que las características de ambos materiales eran petrológica y petrográficamente idénticas. Se seleccionó esta pequeña construcción

rural incendiada hace aproximadamente una década para evitar el muestreo innecesario de edificios históricos protegidos.

En las Termas se tomó una única muestra que constituía una laja intensamente enrojecida de máximo espesor de 1 cm, y tomada de la parte basal del *Caldarium* de las termas. En la Iglesia de san Martín se tomaron tres pequeños fragmentos de la fachada, incluyendo zona con rubefacción y zona sana, siglados conjuntamente como UNC-001. Del edificio rural se tomaron cuatro muestras sigladas como UNC-002, 003, 004 correspondientes fragmento quemados sueltos y UNC-005, que era un sillarejo de unos 15 x 10 cm, del mampuesto de uno de los muros de la casa. En todas las muestras recogidas se realizaron láminas delgadas y difracción de rayos X. Para el resto de los ensayos se utilizaron las muestras UNC-002, 003, 004 y 005.



**Figura 11.2:** A la izquierda, detalle de uno de los paramentos de la Sala de las Bóvedas de la Torre de las Campanas de la Catedral Nueva de Salamanca en el que se observan las rubefacciones y ennegrecimientos producto del fuego. La imagen está tomada durante los trabajos de restauración, habiéndose relleno los huecos entre sillares con mortero de restauración. A la derecha se observa una imagen de la Sala de las Bóvedas, una vez restaurada, como entorno museístico.

En la Catedral de Salamanca se realizó un estudio aprovechando una restauración de la torre denominada de las Campanas, de la Catedral Nueva, que se realizó entre 1997 y

2002 para establecer un entorno museístico en la Catedral. Concretamente, se estudió la sala llamada “de las bóvedas” (figura 11.2) que se incendió alrededor de 1715 debido a un rayo que entró por una de las ventanas de la sala (Berriochoa, 2002).

El muestreo en la Sala de las Bóvedas incluyó la recogida de 10 fragmentos siglados como SAL-001 a SAL-010. SAL-001, SAL-002 y SAL-010 correspondían a muestras en las que se observaba una secuencia que incluía una capa superficial negruzca, una capa de color rosáceo y zona de material sin afectar. SAL-003, SAL-004, SAL-005 y SAL-006 son fragmentos de arenisca completamente ennegrecida con tamaños entre 3 y 8 cm y en algunos de los casos con la presencia de mortero de restauración como parte de la muestra. La muestra SAL-007 correspondía a un fragmento de arenisca sin quemar. SAL-008 y SAL-009 eran muestras de arenisca del paramento tratada con mortero de restauración.

El color de las muestras se calculó como la media de diez medidas realizadas con un espectrofotómetro *MINOLTA CM-2002* con iluminante D65 y ángulo del observador estándar de 10°, en cada una de las zonas quemada y sana, utilizando los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  (CIE, 1986) e índices de blanco (WI) y amarillo (YI), propuestos por la norma ASTM E313 (ASTM, 2000). Para la medida del cambio de color se utilizó la expresión del sistema CIELAB (CIE, 1986):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

La descripción petrográfica de los materiales se realizó con microscopio de polarización Zeiss Axioscop como se refiere en detalle en el capítulo anterior. La composición mineralógica se analizó mediante difractómetro de rayos X de polvo PHILIPS PW-1752, radiación Cu-K $\alpha$  y condiciones del tubo de 40 kV y 30 mA. Para el estudio detallado de los minerales de arcilla se utilizó una técnica de difracción de rayos X basada en la extracción de concentrados mediante presión en un filtro de membrana. Esta técnica evita la “estratificación” que se produce en los métodos de concentración basados en la precipitación por gravedad (técnica de agregado orientado) y permite obtener mayor definición en muestras que contienen arcillas como material accesorio, como es en este caso. La técnica, descrita en detalle por McAlister y Smith (1994), se basa en la succión mediante una jeringa a la que se ha acoplado un filtro de membrana de una solución formada por la muestra de arenisca una vez seca, machacada y tamizada

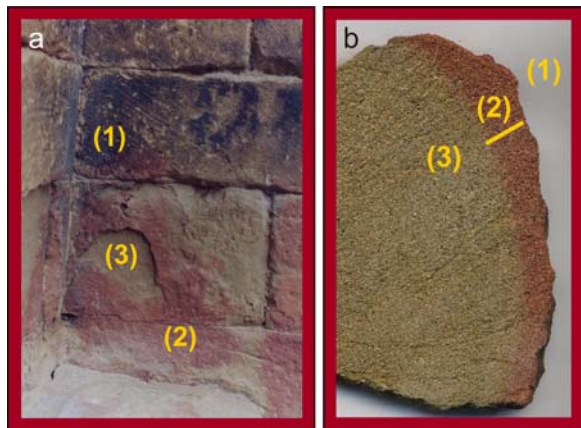
(63  $\mu\text{m}$ ) en acetato de amonio. Esta solución se centrifuga antes del succionado para separar el componente arcilloso. En estas determinaciones se utilizó un difractómetro Siemens D5000 con radiación Cu-K $\alpha$  y discriminación de la altura del pulso.

Se realizó Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR) con un aparato NICOLET Magna FTIR 750. Los análisis termogravimétricos (Termogravimetría (TG) y Calorimetría Diferencial de barrido (DSC)) de las muestras se llevaron a cabo con una unidad simultánea TG/DSC SETARAM, TG-DSC 92-16 empleando una tasa de calentamiento de 10°C/min. La microscopía electrónica se realizó tanto en modo de electrones secundarios como retrodispersados con un microscopio JEOL JSM 6400 equipado con un detector EDX (Oxford INCA). La caracterización del sistema poroso se realizó con un Porosímetro de Intrusión de Mercurio Micromeritics Autopore IV. Se determinó el hierro, tanto ferroso como férrico, en las muestras por medio de valoración con permanganato potásico tras ataque ácido.

Excepto en el caso de los difractogramas obtenidos por la técnica de membrana, los análisis se llevaron a cabo como “análisis de roca total” para cada una de las áreas (es decir, afectada e inafectada por el fuego) comparándose de manera simultánea los efectos en los granos del esqueleto y en la matriz. Se tomaron como estándares de comparación las zonas inafectadas de las muestras y no muestras frescas de cantera. Las metodologías que utilizan muestras de cantera como estándar para la cuantificación del deterioro o la valoración de tratamientos son frecuentes en los estudios sobre deterioro y comportamiento de los materiales pétreos (Villegas, 1991; Esbert y Alonso, 1995; Rodríguez y Alcalde, 1998; Álvarez et al, 2002). Sin embargo, como se discutía en el capítulo anterior, para el estudio de agentes como el fuego, donde el deterioro producido por un agente puntual se suma a los procesos de deterioro previos, es importante el poder utilizar como material estándar muestras que hayan sufrido la misma historia de deterioro previa al incendio que los materiales afectados por el fuego. Al utilizar las zonas inafectadas como patrón de comparación se evitan los cambios inherentes que pudieran diferenciar una muestra del edificio que ha sufrido una historia más o menos compleja de agentes de deterioro de una muestra inalterada tomada de una cantera.

### 11.1.1. Efectos del fuego en areniscas con matriz calcárea (Piedra de Uncastillo).

Según la clasificación de Pettijohn et al (1972), la arenisca de Uncastillo se define petrográficamente como una Litoarenita Cacitica granosoportada de grano medio (para una descripción petrográfica más extensa referirse al capítulo anterior). Este material puesto en obra presenta un color amarillento oscuro que se vuelve rojo intenso al quemarse. En las Termas Romanas, las rubefacciones se relacionan con el uso del edificio. Así, las partes afectadas corresponden a la base del *Caldarium*, que era la zona de las termas destinada a los baños calientes. En la Iglesia-Museo de san Martín, las rubefacciones y ennegrecimientos aparecen asociados a los muros externos del edificio, con preferencia en esquinas cóncavas, y están relacionadas con fuegos vandálicos.



**Figura 11.3:** Detalle de la Iglesia de S. Martín (a) y muestra seccionada UNC-005 (b). Se observa la secuencia: capa de cenizas (1), zona rubefactada (2) y zona inafectada (3).

Tanto en las observaciones *in situ* como en las muestras seccionadas se observa una secuencia de capas como la que se representa en la figura 11.3. La parte más externa consiste en un depósito de cenizas del orden de décimas de milímetro (1). Este depósito no siempre está presente y se relaciona con las partes más distales de lo que se supone que es el origen del fuego. Así por ejemplo en la figura 11.3a se

observa como en la parte inferior de la fotografía, donde se debía de situar la fuente de ignición, la capa negruzca está ausente, mientras que aumenta su importancia a medida que nos alejamos del foco del fuego.

En el caso de las Termas, esta capa no aparece en ninguno de los casos, posiblemente debido a que ha sido eliminada por la erosión posterior, debido al largo lapso de tiempo entre el quemado y el momento actual.

Con respecto a la capa rojiza (2), su espesor es muy variable debido a que está condicionado por la intensidad y duración del fuego. En el caso de los fuegos accidentales o provocados de relativa corta duración, como es el caso de los producidos tanto en la Iglesia-Museo de S. Martín o en las construcciones rurales, esta capa tiene un

espesor medio de aproximadamente un centímetro. En las Termas, donde los fuegos eran de alta intensidad y duración (debido a que eran parte de la función del edificio), esta capa llega a espesores de hasta 15,5 cm.

La zona interna inafectada (3) muestra iguales características que los materiales situados en zonas del edificio alejadas de los focos de incendio, lo que demuestra que el fuego no tiene consecuencias en estas zonas internas.

Con respecto a las morfologías de deterioro, las principales formas observadas en todos los edificios son la disgregación granular y el desplazado de capas de material. También se observan de manera más localizada, alveolizaciones y otras formas de deterioro relacionadas con la cristalización de sales. No se observan grandes diferencias más allá del deterioro estético en el tipo de morfologías de deterioro entre las zonas afectadas por el fuego y las zonas inafectadas. Las capas rojizas presentan un ligero aumento de la resistencia mecánica a la flexión (apreciable aplicando una flexión sobre el material de forma manual) y en el caso de la existencia de desplazados epigenéticos con respecto al episodio de fuego, se observa que los planos de despegue tienden a situarse en la interfase entre la zona rojiza y la zona inafectada. Sin embargo no existen criterios que indiquen que los desplazados existentes en las zonas afectadas por el fuego sean singenéticos con respecto a los incendios. Así, tampoco se observa una mayor presencia de desplazados en las zonas afectadas por el fuego. Como morfología de deterioro asociada a las zonas quemadas, en las termas aparecen ocasionalmente costras calcáreas. En general los paramentos afectados por el fuego no presentan morfologías de deterioro que pudieran indicar un debilitamiento estructural, por lo que el estado de conservación se puede considerar como aceptable en lo referente a este punto y dejando de lado el intenso deterioro estético que supone la rubefacción de los sillares.

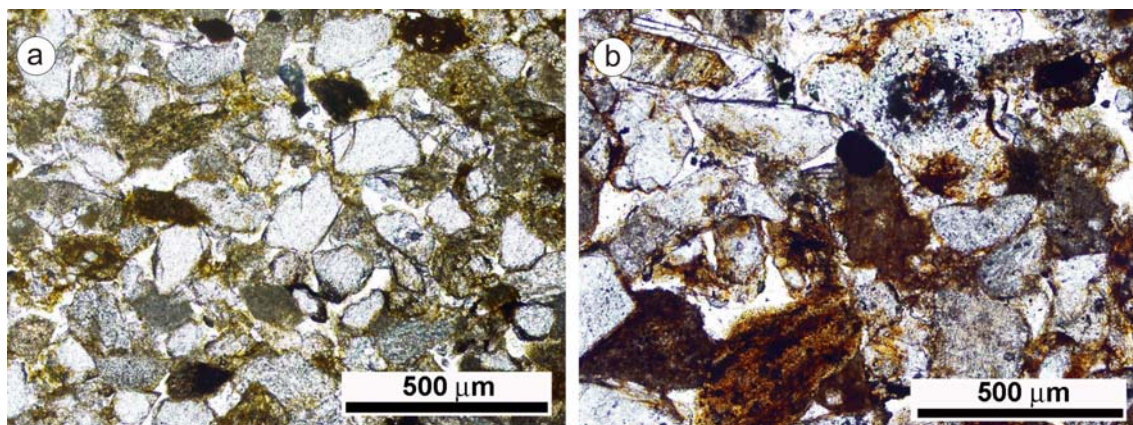
El color de las muestras en se midió en la muestra UNC-005 seccionada, obteniéndose los datos de la tabla 11.1.

**Tabla 11.1:** Color y cambio de color en la arenisca de Uncastillo

	L*	a*	b*	WI	YI
Zona sana	49 ± 2	5,0 ± 0,6	21 ± 2	-16 ± 2	46 ± 3
Zona roja	39 ± 3	14 ± 2	20 ± 1	-12 ± 2	51 ± 3
	$\Delta E^*$			$\Delta WI$	$\Delta YI$
	14			4	5

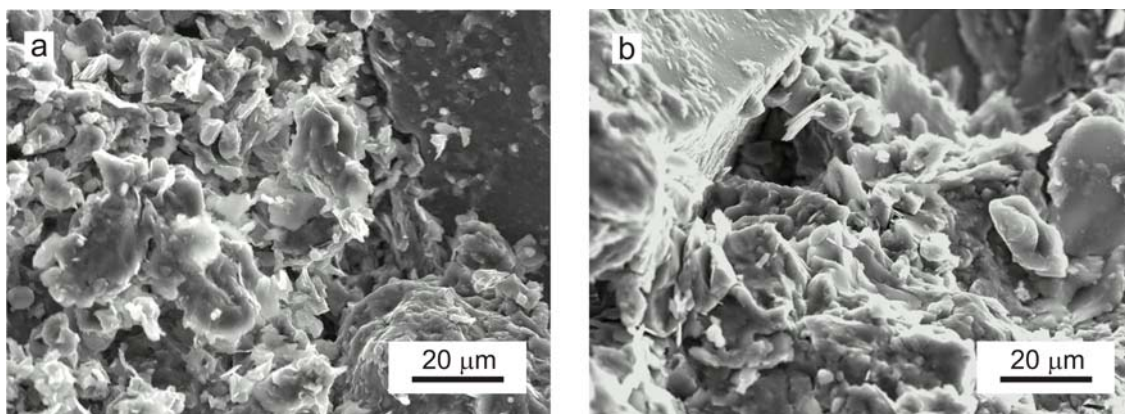


La observación petrográfica de las rocas quemadas muestra que los granos del esqueleto apenas se ven modificados tras el incendio (figura 11.4). Por otro lado, se observa que la textura de la matriz permanece prácticamente intacta aunque se observa un cambio notable de color y la aparición de texturas colomorfas de forma puntual. Esto se relaciona con los experimentos realizados en laboratorio con esta litología, detallados en el capítulo anterior, en los que no se observan cambios macroscópicos importantes, aparte del cambio de color hasta temperaturas superiores a 700 °C, temperatura a la que comienzan a aparecer en la superficie indicios de calcinación de los carbonatos. En todos los casos, el combustible que alimentó los fuegos (fundamentalmente combustibles vegetales como madera o paja) no tiene una capacidad calorífica suficiente para aumentar la temperatura por encima de ese límite.



**Figura 11.4:** Fotomicrografías con nicoles paralelos de muestras de edificio de arenisca de Uncastillo inafectada (a) y afectada (b) por el fuego.

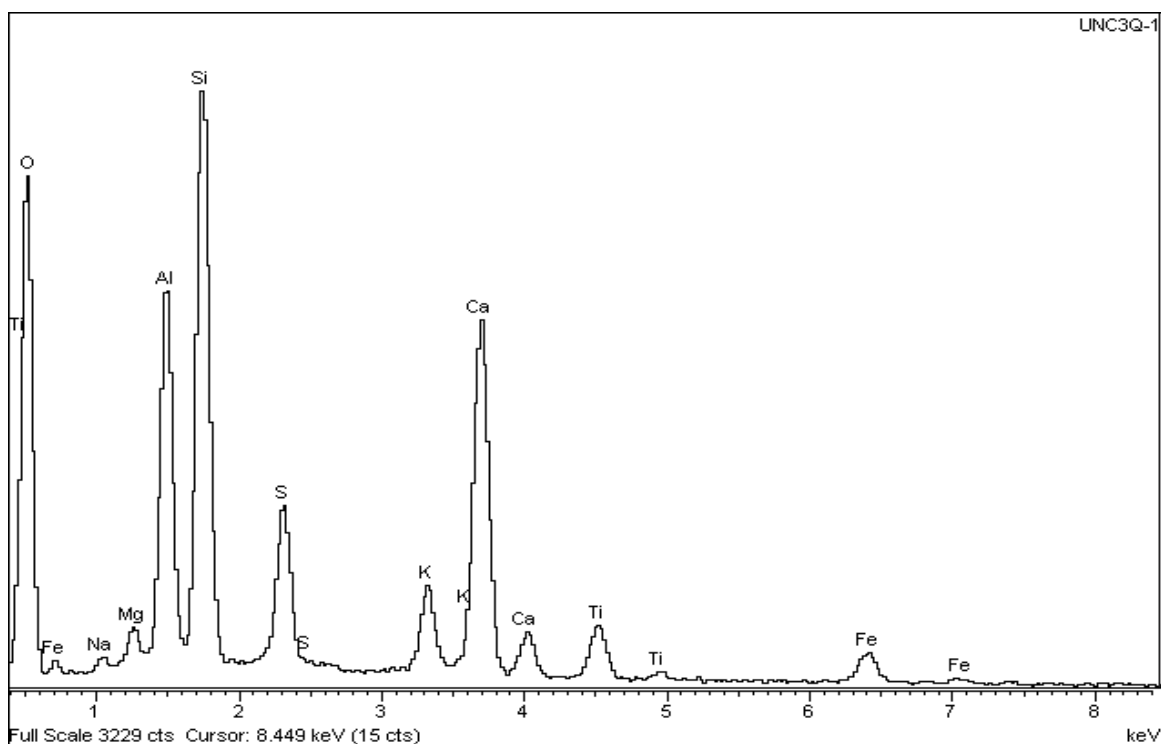
Las observaciones con microscopio electrónico de barrido (Figura 11.5) muestran que la roca no ha sufrido variaciones morfológicas importantes con el fuego. La matriz que aparece, cuando no está afectada por el fuego, como una masa homogénea grumosa y muy poco porosa de carbonato micrítico con pequeños contenidos de arcilla intersticiales se mantiene relativamente invariable.



**Figura 11.5:** Imágenes de SEM-electrones secundarios de muestras de edificio de arenisca de Uncastillo inafectada (a) y afectada (b) por el fuego.

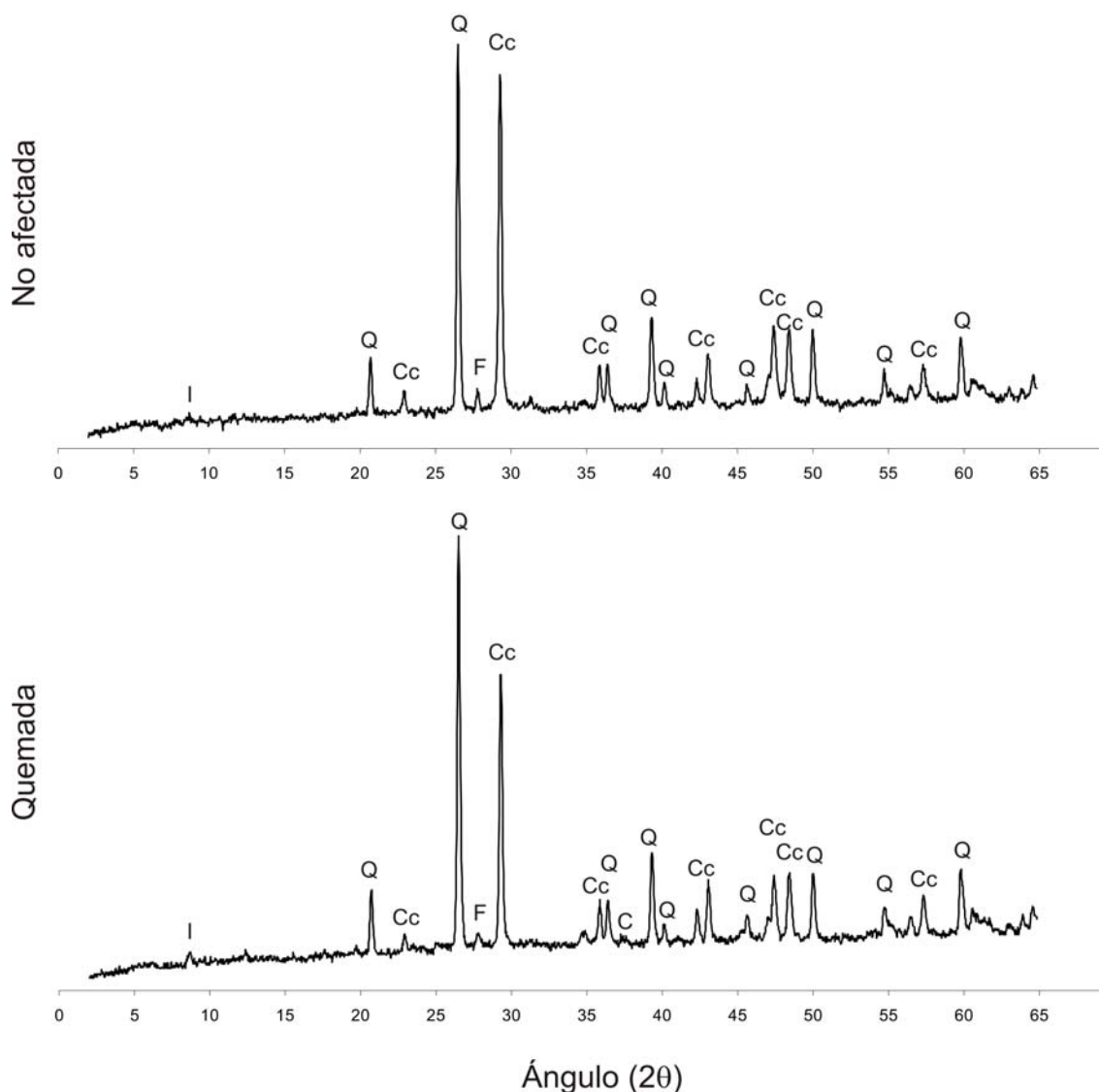
En general solo se observa que el aspecto grumoso de la matriz aparece más acentuado, debido a un ligero aumento de la porosidad y a la ruptura parcial de los minerales arcillosos, en los que se observa una apertura de las láminas.

En las muestras quemadas se observan de manera esporádica y hacia el borde de las muestras algunos gránulos de morfologías irregulares incluidos en la porosidad de la matriz. Los análisis puntuales de energía dispersiva de rayos X (Figura 11.6) muestran que corresponden a cenizas principalmente silicoaluminicas con contenidos de azufre.



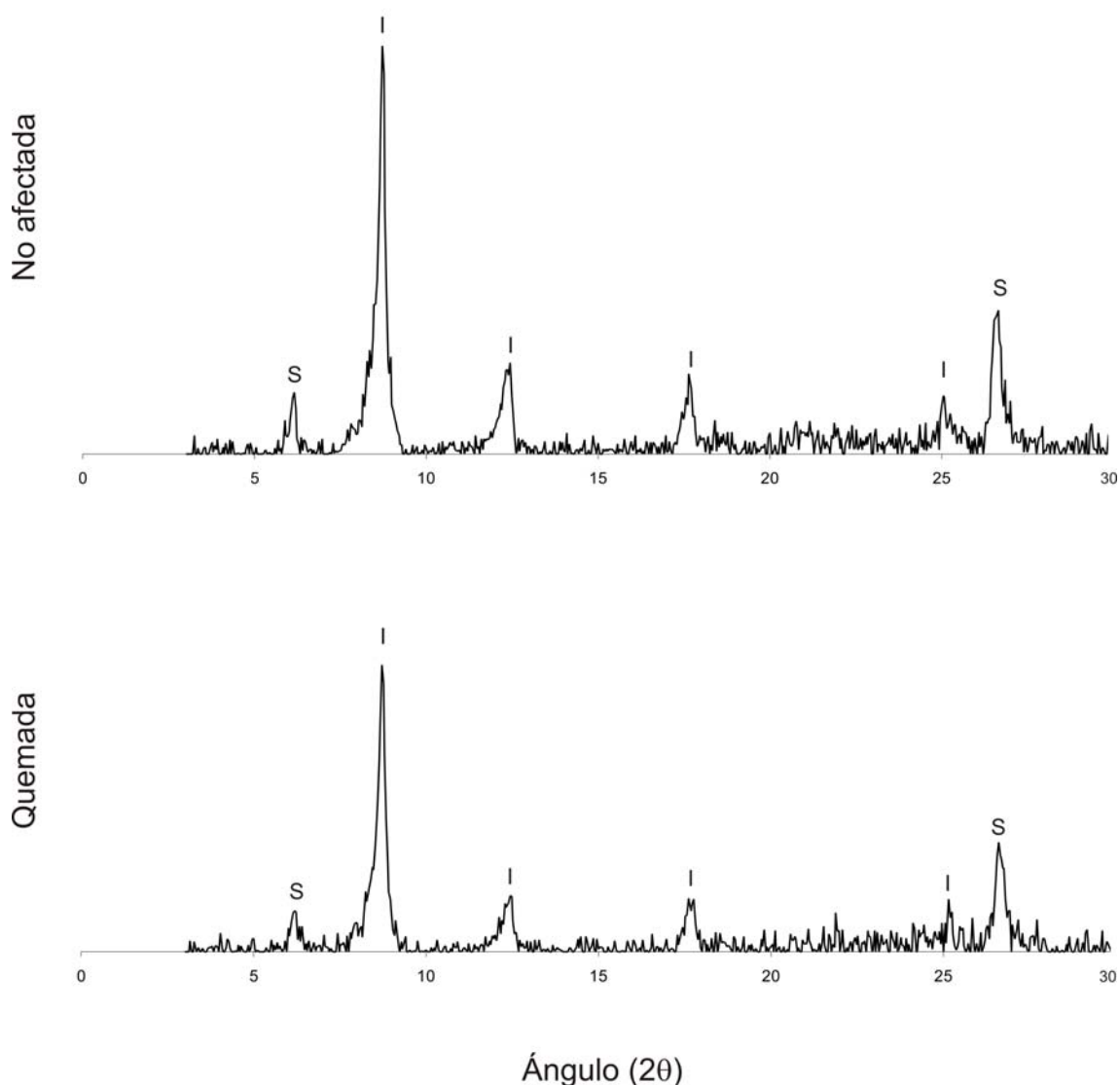
**Figura 11.6:** Análisis EDX de cenizas en muestras quemadas de arenisca de Uncastillo.

Los resultados de difracción de rayos X (Figura 11.7) muestran que existe una pequeña disminución de la intensidad relativa de los picos de calcita y la aparición de manera muy incipiente de picos de óxido de cal. En algunas de las muestras quemadas (aquellas que incluían la capa exterior negruzca) aparecen también algunos picos nuevos de muy pequeña intensidad relacionados con materia carbonosa proveniente de las cenizas.



**Figura 11.7:** Cambios minerales en la arenisca de Uncastillo (UNC-003) con el quemado. Cuarzo (Q), Calcita (Cc), Feldespato potásico (F), Illita (I) y Óxido de calcio (C).

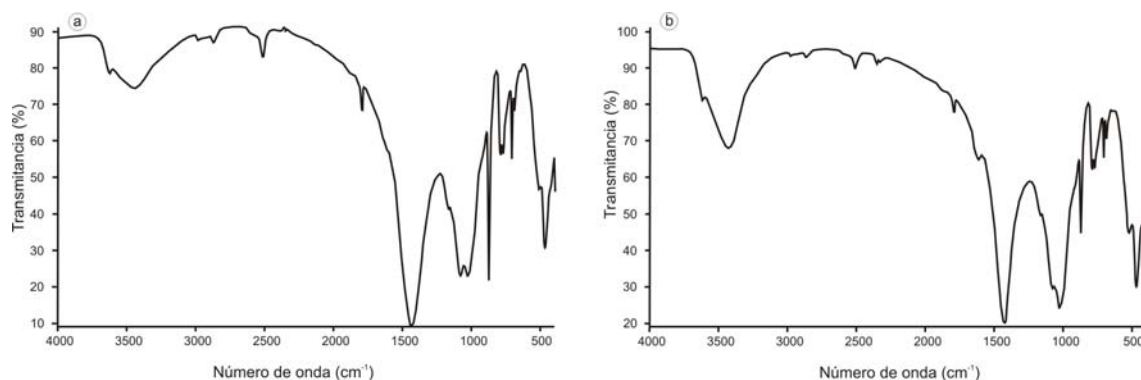
Respecto a los resultados de la fracción arcillosa (Figura 11.8), se observa que no existe una variación notable manteniéndose las intensidades y espaciados en los minerales, lo que indica que las temperaturas alcanzadas en los fuegos no fueron lo suficientemente altas para producir cambios modificaciones estructurales en los filosilicatos.



**Figura 11.8:** Difractogramas de la fracción arcilla de la arenisca de Uncastillo (UNC-005) obtenidos por “técnica de membrana”. Illita (I), esmectita (S).

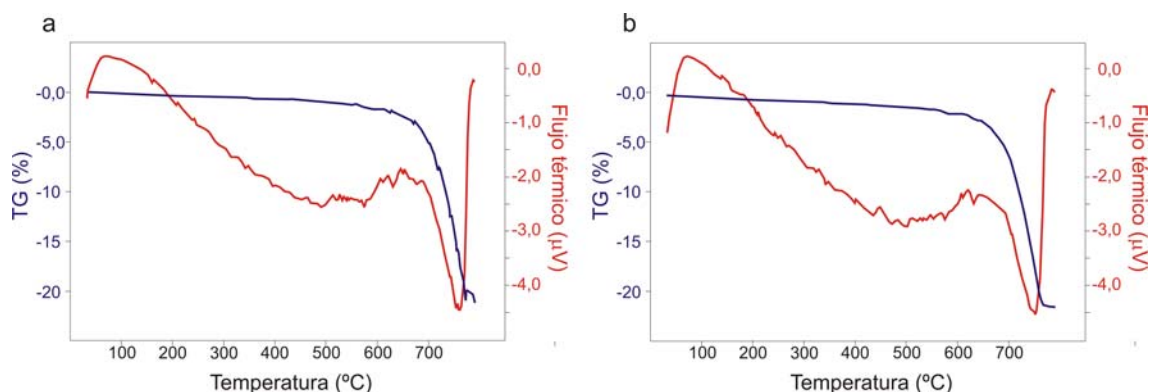
No obstante, el estudio de los minerales de la arcilla se realizó sobre la muestra UNC-005, tomada de la construcción rural y, como se ha comentado antes, el carácter accidental y puntual de este incendio implica que las temperaturas alcanzadas fueran menores si se compara con las condiciones que debieron tener lugar en las termas (lo

que se confirma por la diferencia notable de espesor de las rubefacciones). Por tanto, el estudio del comportamiento de las arcillas en el caso de las termas podría variar notablemente pero la cantidad de muestra tomada en el yacimiento arqueológico resultaba insuficiente para realizar esta determinación.



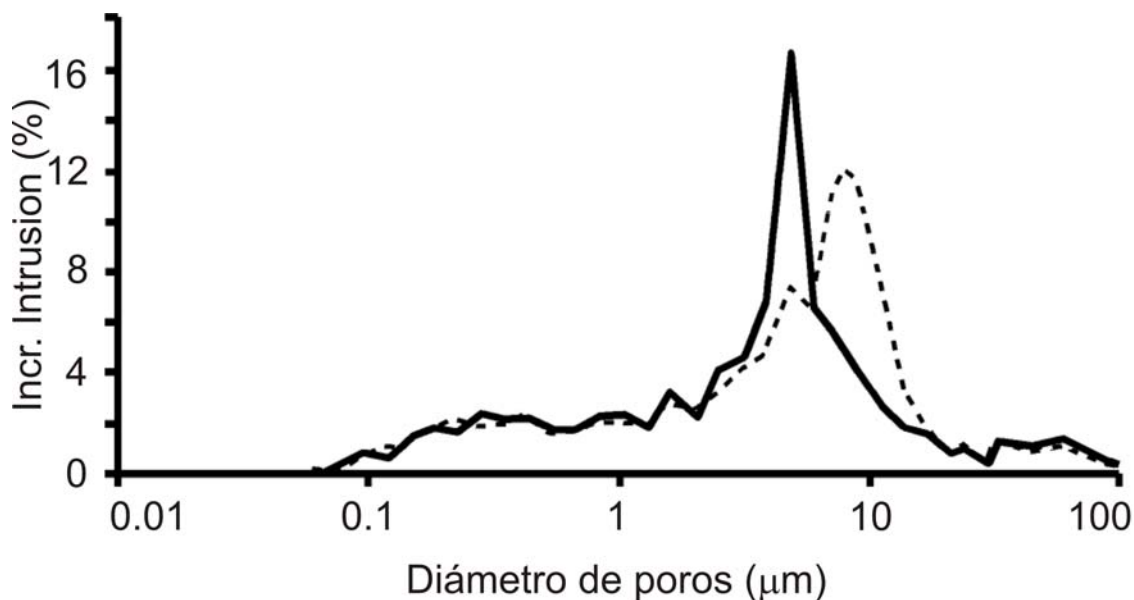
**Figura 11.9:** Espectros de infrarrojos de muestras de arenisca de Uncastillo inafectadas (a) y afectadas (b). Los diagramas corresponden a la muestra UNC-002.

Los espectros de infrarrojos de las muestras quemadas de Uncastillo (figura 11.9) no muestran grandes diferencias con las muestras sanas. Las principales bandas espectrales corresponden a la calcita (bandas a 2875, 2513, 1798, 1425, 875 y 712  $\text{cm}^{-1}$  principalmente) y a silicatos (cuarzo e illita-esmectita) (3620, 1165, 1082, 1032, 797, 778, 694 y 470  $\text{cm}^{-1}$ ). En las muestras quemadas se observa la aparición de pequeñas bandas en la zona de 2350  $\text{cm}^{-1}$  que corresponden a enlaces C-H y que se pueden interpretar como resultado de las cenizas presentes de forma superficial e intersticial en las zonas más externas de las muestras.



**Figura 11.10:** Curvas TG (azul) y DSC (rojo) en las muestras de arenisca de Uncastillo inafectadas (a) y afectadas (b). Muestra UNC-002

Los análisis termogravimétricos tampoco muestran diferencias apreciables. El único dato a reseñar es la presencia en la muestra quemada de un pequeño pico exotérmico alrededor de 450 °C que puede atribuirse a la presencia de óxidos de hierro coloidales.



**Figura 11.11:** Distribución de la porosidad en las muestras de arenisca de Uncastillo inafectadas (línea continua) y afectadas (línea de trazos). Muestra UNC-004

El análisis de la porosidad muestra que la porosidad total de la roca aumenta ligeramente, así como la mediana de la distribución de poros (Tabla 11.2). La distribución de los poros (Figura 11.11) pasa de una distribución monomodal con un pico máximo en 6 μm en las muestras sanas a una distribución levemente bimodal en muestras quemadas donde destaca la aparición de un nuevo pico máximo a 10 μm descendiendo la importancia relativa del pico de 6 μm. La disminución de la importancia relativa del pico de 6 μm se puede deber a fenómenos de coalescencia de poros que se producen relacionados con el proceso de calcinación de la calcita (Boynton, 1980).

**Tabla 11.2:** Datos de Porosimetría de Intrusión de Mercurio para muestras de arenisca de Uncastillo (UNC-004).

	Inafectada	Afectada
<b>Porosidad (%)</b>	19.0	19.4
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.23	2.19
<b>Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.75	2.72
<b>Superficie específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	0.28	0.27
<b>Mediana del tamaño de poros (μm)</b>	5.28	6.58
<b>Media del tamaño de poros (μm)</b>	1,21	1,29

Este aumento del tamaño relativo de poros puede encontrar su causa en la aparición de porosidad secundaria debida a los fenómenos de apertura de láminas de los filosilicatos (illita) que se observaba en la microscopía electrónica y a la disrupción parcial de la estructura de la matriz durante el quemado.

Con respecto a los contenidos en hierro (Tabla 11.3) se observa como en las muestras quemadas aumenta el contenido en hierro total. El ratio entre hierro férrico y ferroso aumenta, lo que indica que el fuego se produjo en condiciones oxidantes, como es propio de un fuego al aire libre. Esta oxidación es la responsable del color rojo intenso de las muestras quemadas.

**Tabla 11.3:** Datos de contenido en hierro ferroso y férrico en arenisca de Uncastillo (UNC-003).

	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
No afectada	0,72	0,96	1,33
Quemada	0,99	2	2,02

En resumen, considerando varios edificios construidos con arenisca de Uncastillo afectados por diversos tipos de fuegos, se puede concluir que los incendios no afectan severamente a las propiedades mecánicas de conjunto de este material, siendo el principal daño producido en la roca es el estético debido al intenso cambio de color que se produce en las piedras quemadas. Comparando las áreas afectadas e inafectadas de edificios que abarcan del siglo I al XX, no se observan diferencias en las tasas de deterioro mecánico de este material que puedan ser directamente imputables a las transformaciones producidas por el fuego. Sin embargo, algunas formas de deterioro, como desplazados causados por otros agentes de deterioro, presentan sus planos de despegue relacionados con las interfases entre zonas afectadas y sanas de la roca. Los cambios en la matriz de la arenisca de Uncastillo son ligeros. No se detectan cambios sustanciales en la mineralogía original y la matriz calcárea permanece inalterada. A escala de microestructuras se produce una ligera variación de la porosidad que no afecta de forma notable texturalmente a la roca.

La composición química varía debido, principalmente, a la oxidación del hierro que, aunque se encuentra de forma dispersa, es responsable del intenso cambio de color que sufren estas areniscas. Las cenizas y humos introducen nuevos componentes químicos, como carbono o azufre, en la matriz. El aumento del contenido en hierro de las muestras



podría provenir de un aporte externo, aunque es más probable que se deba a la misma heterogeneidad de la muestra de partida.

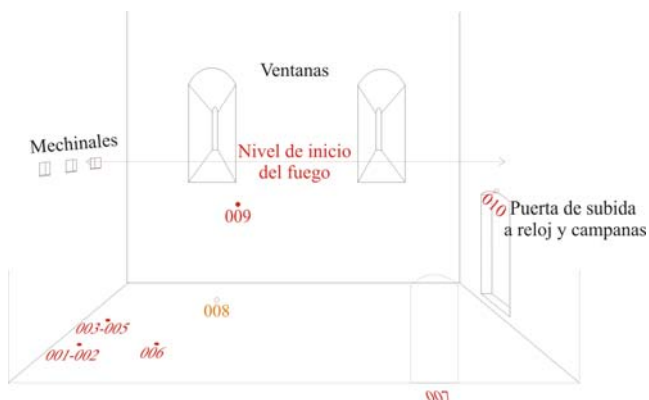
No obstante el escaso daño mecánico producido por el fuego, el deterioro estético del material es suficiente para considerar el fuego como un agente extremadamente dañino para este material, pues el intenso cambio de color que se produce, debido tanto al enmugrecimiento provocado por las cenizas como a la rubefacción generada por la oxidación térmica del hierro, produce una variación muy importante de la apreciación estética de este tipo de arenisca.

Como consecuencia del análisis mineralógico de esta arenisca y por comparación con el comportamiento en laboratorio a diversas temperaturas estudiado en el capítulo anterior, se puede concluir el rango de temperaturas que alcanzó en superficie este material en los incendios estudiados. Debido a que se produce oxidación térmica del hierro, la temperatura debió de ser mayor de 300 °C que comienza la rubefacción del material. Por otro lado, la temperatura tuvo que ser menor de 800 °C, puesto que no se detectan rasgos de calcinación de la calcita. Este intervalo se puede acotar más debido a que en los análisis de difracción de la fracción fina no se observa destrucción estructural irreversible de los minerales de la arcilla encontrados. Así, el fuego no pudo haber alcanzado los 550 °C. Por lo tanto se puede asegurar que este tipo de fuegos se dio en el rango (300-550 °C). Sin embargo, a la vista de los resultados cromáticos alcanzados por las muestras de cantera de este material en los ensayos de laboratorio, resulta muy probable que la temperatura de estos incendios se situase en torno a 500 °C, lo que es un valor bastante normal en fuegos producidos en medios naturales (Ollier y Ash, 1983; Allison y Goudie, 1994).

#### **11.1.2. Efectos del fuego en areniscas con matriz silícea (Arenisca de Villamayor).**

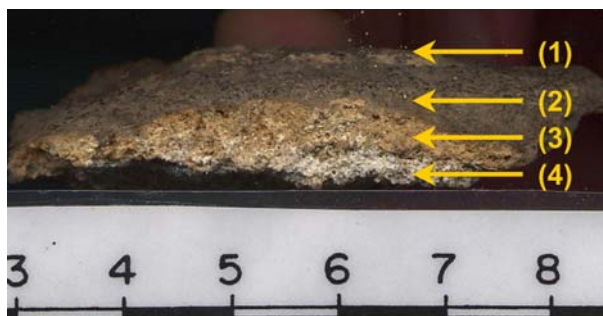
La arenisca de Villamayor es una subarcosa matriz-soportada de grano fino (descrita más detalladamente en el capítulo anterior). Macroscopicamente presenta un color ocre heterogéneo que, por la acción del fuego, varía a tonos rosados y naranjas como se observó en los ensayos de laboratorio realizados en el capítulo anterior.





**Figura 11.12:** Esquema de la Sala de las Bóvedas en el que se incluye la distribución de muestras recogidas.

la figura 11.12). Esta sala, que actualmente es una estancia única, en el momento que se incendió presentaba dos niveles; el segundo de ellos apoyado en una serie de vigas cuya posición se evidencia por los mechinales que se observan en los paramentos. El incendio, producido hacia 1750 por un rayo, comenzó en el nivel superior de la habitación, siendo el combustible fundamentalmente madera.



**Figura 11.13:** Muestra SAL-010. Se observa la secuencia: capa de cenizas superficiales (1), capa con cenizas intersticiales (2), zona rubefactada (3) y zona inafectada (4).

Las muestras para este estudio corresponden a la Sala de las Bóvedas de la torre de las campanas de la Catedral de Salamanca, excepto la muestra de roca sana que se extrajo de otra sala no afectada por el incendio (SAL-007). Como se indicó anteriormente se recogieron 10 muestras (cuya posición se refiere en el esquema de

En varias de las muestras (SAL-001, SAL-002 y SAL-010) se observa una secuencia similar a la observada en la arenisca de Uncastillo, aunque aquí con más complejidad. Un ejemplo de esta secuencia se representa en la figura 11.13. La parte más externa (1) es un fino depósito de ensuciamiento (no mayor de 0,5 mm) que incluye tanto suciedad posterior como cenizas.

Debido a que los trabajos de restauración se estaban llevando a cabo durante el muestreo, esta capa se había eliminado en varias zonas.

Independientemente del depósito superficial, aparece una capa de arenisca de color negruzco (2), debido a la presencia intersticial de residuos de combustión, con un espesor medido máximo de 2,2 cm. Esta capa alcanza los mayores espesores en el suelo de la sala, y en algunos casos es la única presente en las muestras recogidas, como en el caso de las muestras SAL-003, 004, 005 y 006.

En los casos en que la muestra es lo suficientemente gruesa para que aparezca la capa coloreada (3) bajo la capa negra, la composición cromática de la misma es bastante heterogénea, presentándose colores anaranjados y/o rojizos. Esto coincide con lo observado en los ensayos de quemado con láser en el laboratorio que mostraron que la variabilidad cromática en la arenisca de Villamayor tras el quemado era mucho mayor que lo que se observa, por ejemplo, en la arenisca de Uncastillo. Esta capa no supera el centímetro de espesor en ninguna de las muestras recogidas.

Con respecto al deterioro del material, aparte del cambio cromático, el principal proceso mecánico que se da es la disgregación granular. Al contrario de lo que sucedía en la Piedra de Uncastillo, las partes quemadas presentan una disminución muy notable de resistencia que se aprecia a simple vista. Así, las muestras de piedra quemada son extremadamente deleznales y se disgregan muy fácilmente bajo una ligera presión. La sillería presenta una serie de fracturas dentadas y levemente curvadas aproximadamente perpendiculares a la superficie del sillar y que en algunos casos han producido el desprendimiento de áreas del sillar (Figura 11.2). El principal origen de estas fracturas se debe al terremoto de Lisboa de 1755 (esta torre está inclinada, llegando a un desnivel de 12 cm hacia el lado de entrada a la Sala de las Bóvedas). El terremoto es posterior al incendio de la torre y es de suponer que la contribución que el fuego puede tener en estas fracturas mayores es escasa. En otras fracturas menores y descamados el efecto mecánico del fuego pudo ser más importante.



**Figura 11.14:** Lámina delgada de muestra SAL-005 en la que se observa el material ennegrecido sobre el que se ha aplicado mortero de restauración (de color claro).

Para remediar el deterioro mecánico de la piedra, en los trabajos de restauración se afianzó la estructura mediante varillas de fibra de vidrio y resina epoxídica. También se reintegraron las faltas de sillares mediante un mortero realizado con

arena y *primal* (resina acrílica) como se ve en la lámina de la figura 11.14 y la imagen 11.15 (izquierda). debido a la baja resistencia del material. Para eliminar el cambio de color producido por el fuego y consolidar ligeramente el material en superficie se aplicó una lechada clara de cal, con la que se frotó la superficie, secándola con secador para evitar que se tornase al color producido por el fuego antes de la limpieza. Las medidas

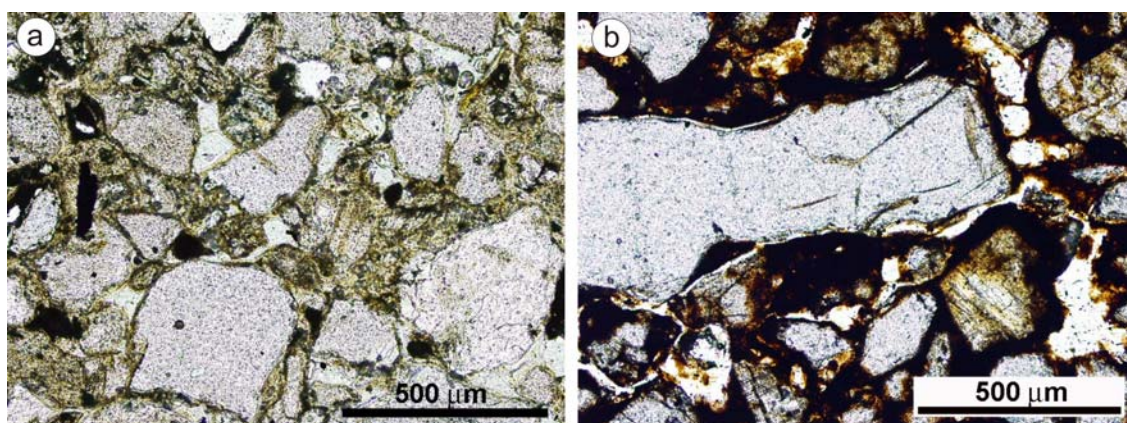
de color obtenidas para cada una de las capas de las muestras recogidas se indican en la tabla 11.4.

**Tabla 11.4:** Color y cambio de color en la arenisca de Villamayor

	L*	a*	b*	WI	YI
Zona sana	$68 \pm 3$	$3,2 \pm 0,6$	$14 \pm 1$	$-4 \pm 3$	$27 \pm 2$
Zona rosa	$59 \pm 3$	$10 \pm 2$	$18 \pm 2$	$-14 \pm 3$	$38 \pm 3$
Zona negra	$30 \pm 2$	$2,9 \pm 0,7$	$6 \pm 1$	$0 \pm 1$	$22 \pm 4$
	$\Delta E^*$			$\Delta WI$	$\Delta YI$
Sana-rosa	11,7			-10	10
Sana-negra	32,1			4	-5



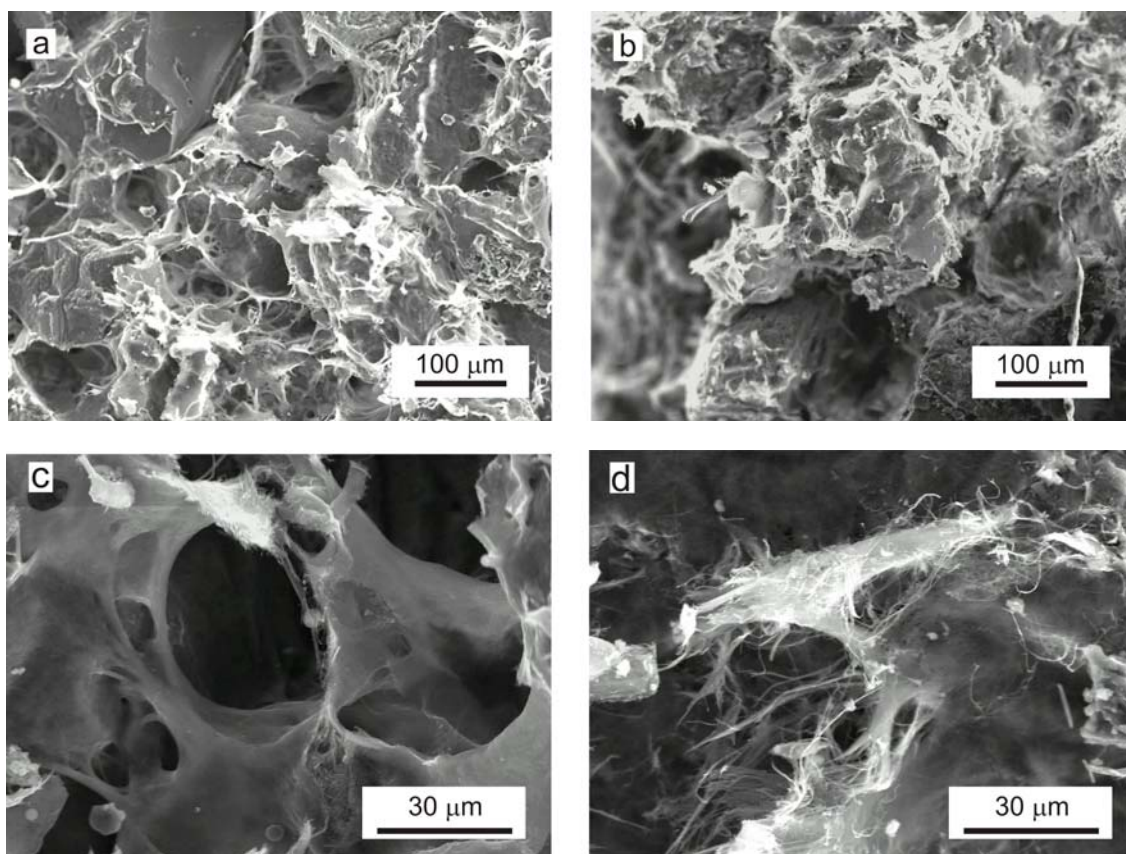
**Figura 11.15:** Zona de toma de muestras SAL-003, 004 y 005 (izquierda) en el suelo de la sala. La zona más clara a la derecha de la imagen corresponde a un área reintegrada con mortero de restauración. Zona de toma de muestra SAL-010 (derecha) en el dintel de la puerta de subida a las zonas superiores de la torre. Se observa el ennegrecimiento superficial del material bajo el cual aparece la capa de tonos anaranjados o rosáceos. El ancho de la foto corresponde a aproximadamente 50 cm.



**Figura 11.16:** Fotomicrografías con nícoles paralelos de muestras de edificio de arenisca de Villamayor inafectada (a) y afectada (b) por el fuego.



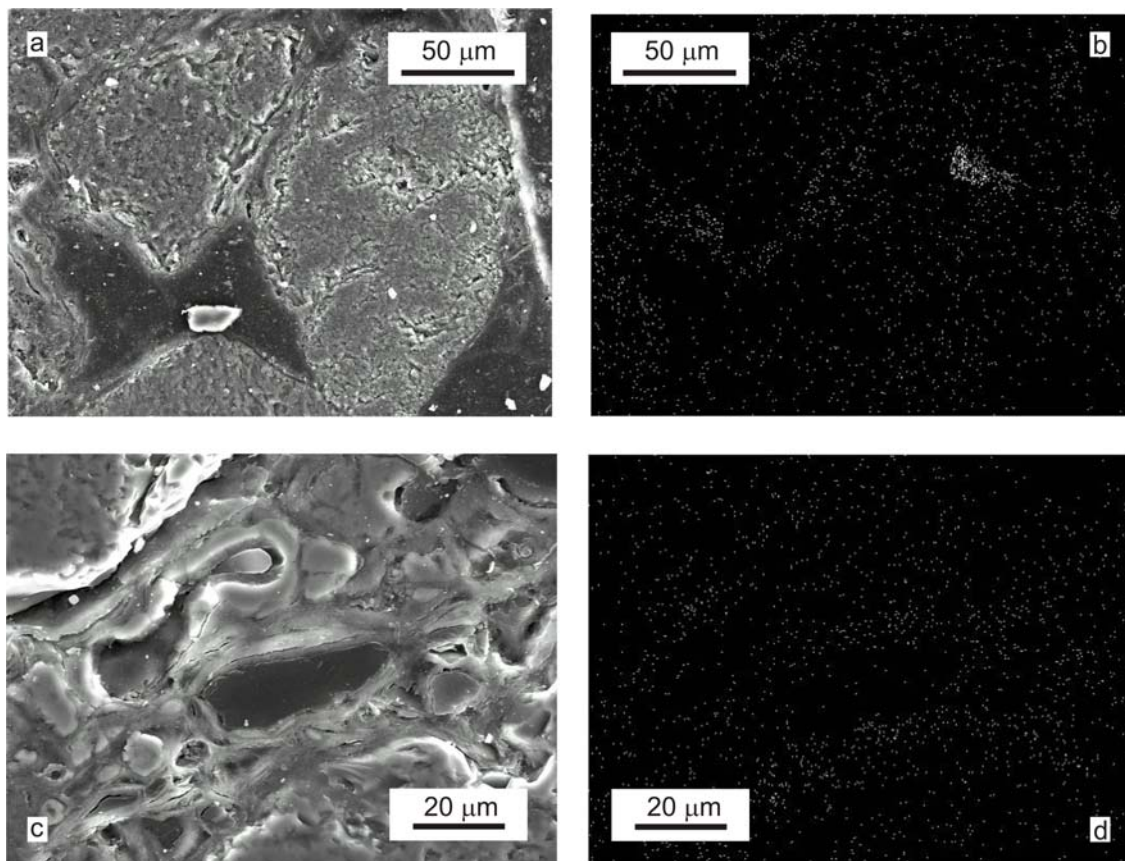
La petrografía de las zonas quemadas muestra que, aunque no se observan alteraciones importantes en los granos del esqueleto (figura 11.16), la textura de la matriz aparece completamente modificada. Se observa una modificación intensa de la porosidad y la matriz quemada presenta un cambio importante de color, apareciendo como una masa homogénea con una práctica desaparición de cualquier textura relacionada con la matriz. La matriz aparece en ocasiones desligada del esqueleto, dando a las muestras una apariencia de descohesión que corresponde con lo observado en muestra de mano. Los granos del esqueleto presentan algunas pequeñas fisuras pero mantienen su integridad, no observándose granos esqueléticos rotos.



**Figura 11.17:** Imágenes de SEM-electrones secundarios de muestras de edificio de arenisca de Villamayor inafectada (a, c) y afectada (b,d) por el fuego.

Con el microscopio electrónico de barrido se observa claramente como en las muestras afectadas por el fuego las texturas de los minerales de la matriz, y en especial de la paligorskita (que es el más abundante) se encuentran completamente destruidas (Figura 11.17) por la rotación de las fibras del mineral. Esto da lugar a que la

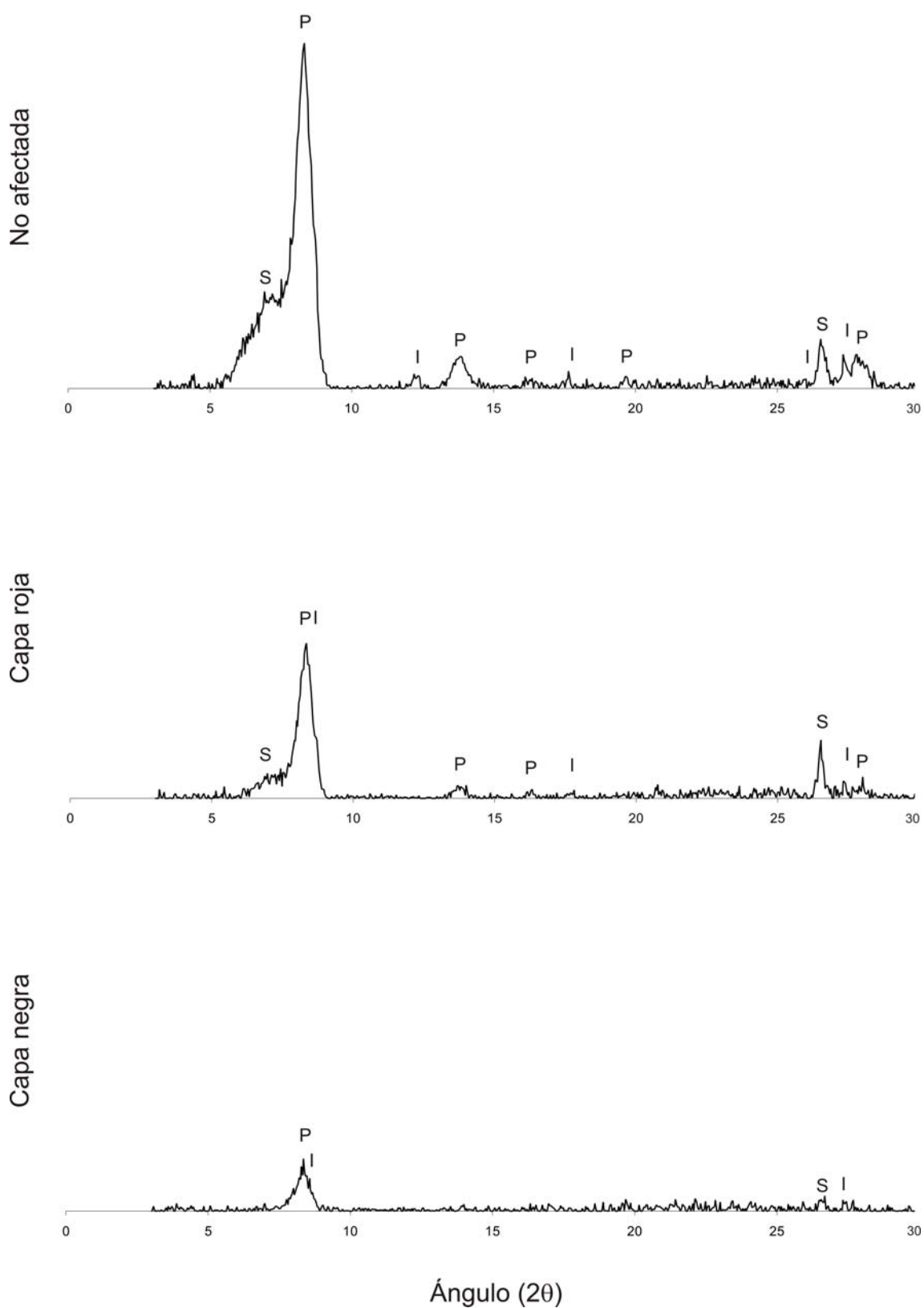
paligorskita adquiera texturas en forma de “escobillas”. Como ya se mencionaba en el capítulo anterior, esta modificación de la paligorskita se debe a que durante los procesos de deshidratación se produce una rotación en los ejes a través de los enlaces Si-O-Si que unen las fibras a lo largo de sus bordes. (Preisinger, 1963). También se observan abundantes restos de cenizas. Los análisis puntuales de energía dispersiva de rayos X en las muestras quemadas mostraban que su composición era principalmente, carbono, fósforo, azufre, cloro y nitrógeno.



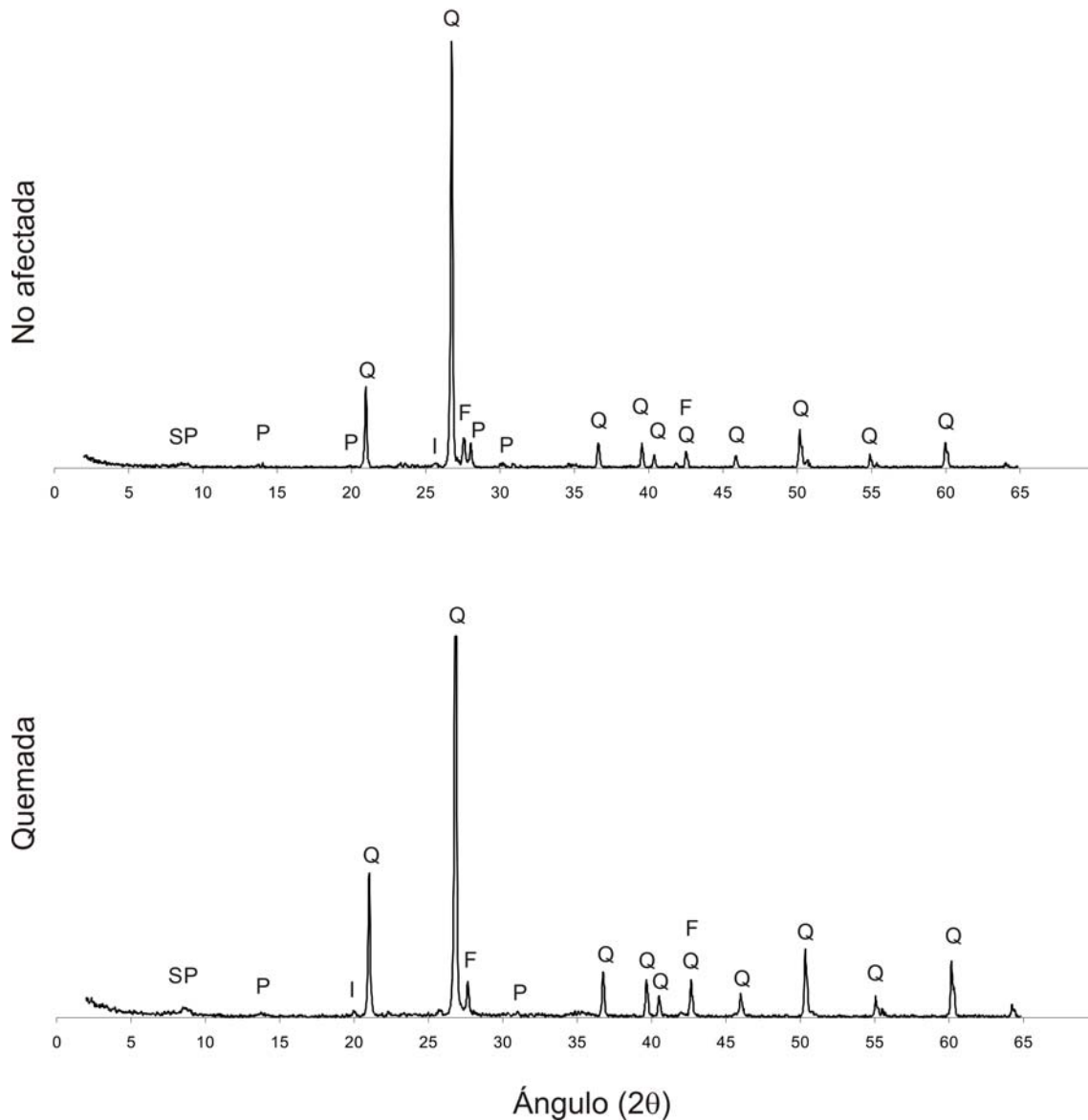
**Figura 11.18:** Imágenes de SEM-electrones retrodispersados y correspondientes mapas de contenido en hierro de muestras de arenisca de Villamayor inafectada (a, b) y afectada (c, d) por el fuego.

En el estudio de secciones de las muestras mediante electrones retrodispersados (Figura 11.18) se observa como el fuego ha modificado la matriz, que ha perdido su textura original, dando lugar a una masa de aspecto más compacto y menos estructurado. En las muestras quemadas también se observan residuos de combustión tapizando los poros que dan lugar a una capa con aspecto amorfo y levemente estratificada rica en elementos ajenos a la roca, principalmente fósforo y azufre. El análisis composicional de estas secciones muestra también que no existen diferencias en

la distribución del hierro. Tanto en el caso de las muestras sanas como de las quemadas el hierro aparece muy disperso en la muestra .



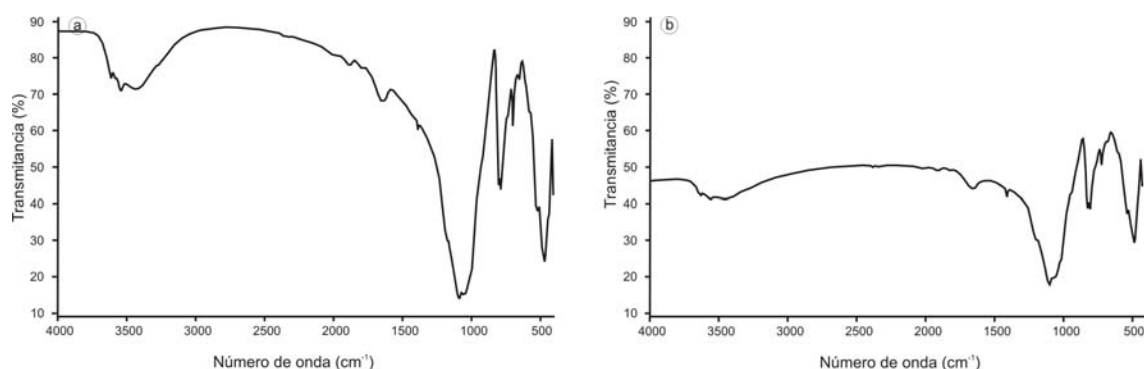
**Figura 11.19:** Difractogramas de la fracción arcilla de la arenisca de Villamayor obtenidos por “técnica de membrana”. Paligorskita (P), Illita (I), Esmectita (S).



**Figura 11.20:** Cambios minerales en la arenisca de Villamayor con el quemado. Cuarzo (Q), Feldespato potásico (F), Paligorskita, (P), Esmeclita (S) e Illita (I).

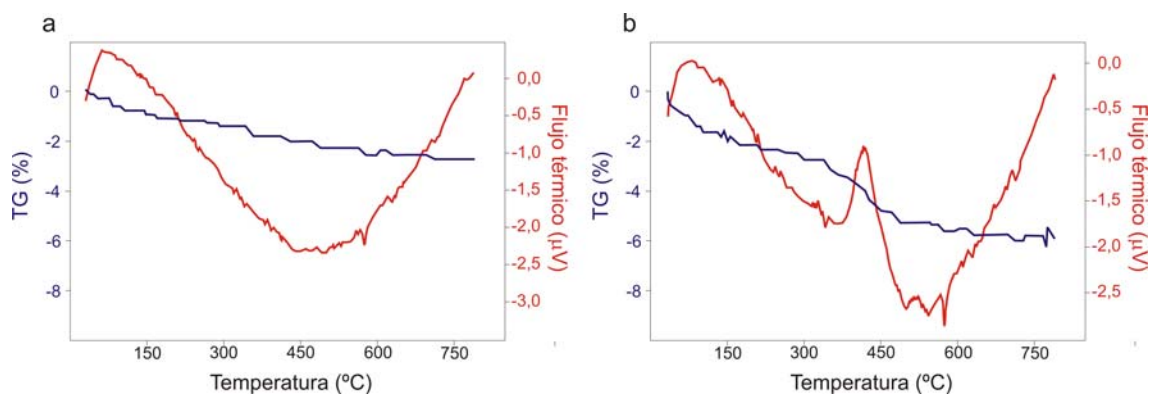
Con respecto a la difracción de rayos X (Figuras 11.19 y 11.20), los cambios más importantes de la arenisca de Villamayor están relacionados con la evolución de la paligorskita y la esmeclita. Los difractogramas muestran cambios en la intensidad de las reflexiones de la paligorskita a 10.5, 4.5, 3.68 y 3.23 Å. Los cambios en estos picos están relacionados con la deshidratación y dehidroxilación de la paligorskita (Hayashi, 1969; VanScoyoc et al., 1979). Las reflexiones de la Esmeclita a 13.6 Å también muestra cambios en la intensidad producidos por la deshidratación (Gu et al., 2001). Sin embargo, estos minerales se detectan aún en las zonas quemadas lo que indica que

aunque se ha producido una deshidratación y dehidroxilación, esta ha sido parcial y han existido procesos de rehidratación parcial. La temperatura propuesta como máxima para que se produzca cierta rehidratación de la paligorskita son 540 °C (Preisinger, 1963; Hayashi, 1969; VanScoyoc et al., 1979).



**Figura 11.21:** Espectros de infrarrojos de muestras de arenisca de Villamayor inafectadas (a) y afectadas (b). Los diagramas corresponden a la muestra.

Los espectros de infrarrojos (Figura 11.21) no muestran diferencias notables, y lo único que destaca es la disminución general de la transmitancia y la disminución de la definición de las bandas en la región de 3400 a 3600  $\text{cm}^{-1}$  (bandas relacionadas con agua y OH) como reflejo de la deshidratación y dehidroxilación de paligorskita y esmectita. Aunque las bandas de 1032  $\text{cm}^{-1}$  y 1165  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas con la esmectita, aparecen parcialmente encubiertas por la intensa banda a 1080  $\text{cm}^{-1}$  del cuarzo, se observa también su disminución de intensidad, especialmente en la de 1032  $\text{cm}^{-1}$ , si las comparamos con la banda de 1080  $\text{cm}^{-1}$  del cuarzo.



**Figura 11.22:** Curvas TG (azul) y DSC (rojo) en las muestras de arenisca de Villamayor inafectadas (a) y afectadas (b).

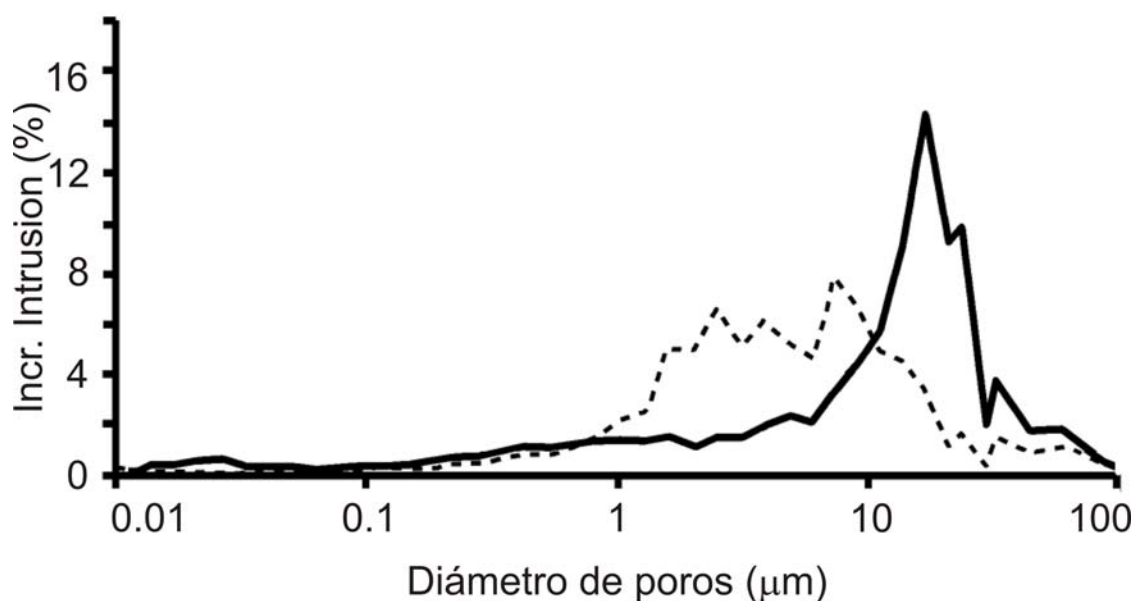


En las curvas termogravimétricas (Figura 11.22) la variación más notable es la aparición de un pico exotérmico a 400-450 °C como el que aparecía en la arenisca de Uncastillo pero de mucha mayor intensidad relacionado con óxidos de hierro férrico.

La porosidad total de la muestra, así como la superficie específica (área de poros) disminuye (Tabla 11.5). La porosidad varía de una distribución monomodal con un pico intenso a 17  $\mu\text{m}$  a una distribución polimodal centrada en 5  $\mu\text{m}$  (Figura 11.23).

**Tabla 11.5:** Datos de Porosimetría de Intrusión de Mercurio para muestras de arenisca de Villamayor (SAL-005,007).

	Infectada	Afectada
<b>Porosidad (%)</b>	31,9	25,3
<b>Densidad aparente (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	1,74	1,84
<b>Densidad real (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	2,56	2,46
<b>Superficie específica (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>	1,89	1,12
<b>Mediana del tamaño de poros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	16,94	5,72
<b>Media del tamaño de poros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,39	0,49



**Figura 11.23:** Distribución de la porosidad en las muestras de arenisca de Villamayor inafectadas (línea continua) y afectadas (línea de trazos).

Al comparar ambas distribuciones de la porosidad se observa que la posición de los picos de porosidad se mantiene y que sólo varía su relación porcentual. Así, los picos de tamaños mayores (17, 24, 33 y 60  $\mu\text{m}$ ) disminuyen proporcionalmente su importancia, mientras que los picos a menores tamaños de poro (1, 1,6 y 5  $\mu\text{m}$ ) la aumentan, apareciendo además un nuevo pico a 7-8  $\mu\text{m}$ . Por un lado la cantidad de residuos de

combustión que se introducen de manera intersticial en el sistema poroso supone un cierre de los poros de mayor tamaño, lo que hace que las proporciones relativas de los picos varíen en el sentido observado. También puede contribuir a esta variación la debilidad estructural de las muestras quemadas, puesto que al perder cohesión y ser materiales más deleznales, las muestras pueden haber sufrido una compactación que cierre los poros mayores pero que preserve los menores. Por otro lado las modificaciones estructurales de minerales como esmectita y paligorskita producen una variación en el tamaño de los poros pequeños, lo que puede explicar la pequeña deriva del pico originalmente a 5  $\mu\text{m}$ , así como la aparición de un nuevo pico a 7-8  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 11.6:** Datos de contenido en hierro ferroso y férrico en arenisca de Villamayor (SAL-003).

	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
No afectada	0,12	0,34	2,83
Quemada (roja)	0,39	1,52	3,90
Quemada (negra)	0,46	0,86	1,87

La medida del contenido en hierro (Tabla 11.6) se realizó sobre una de las muestras que representaba la capa negra exterior en la zona del suelo de la sala. Se incluye uno de los análisis realizados en una muestra quemada en laboratorio con láser y con cambio de color hacia el rojo. Mientras que la muestra roja presenta la tendencia normal en la cual el ratio Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO aumenta, la muestra negra analizada presenta la tendencia opuesta. Esta muestra proviene del suelo de la sala, que si observamos el diagrama de la figura 11.12, se situaba en una zona que debió tener muy poco aporte de oxígeno durante todo el incendio. Esta combustión en ambiente reductor explicaría la disminución del ratio Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO así como la ausencia de colores rojizos en la muestra.

Como resumen, el fuego debilita notoriamente la estructura de conjunto de la arenisca de Villamayor, siendo los cambios dinámicos macroscópicos de este material reflejo de los cambios microscópicos producidos por el fuego. Estos cambios afectan fundamentalmente a la matriz arcillosa, mientras que los granos esqueléticos permanecen relativamente intactos.

El principal efecto del fuego es el cambio textural y estructural de la matriz, especialmente por las modificaciones en los minerales de la arcilla. Los cambios estructurales de estos minerales debido a los procesos de deshidratación – rehidratación se traduce macroscópicamente en un debilitamiento de la piedra. Estos cambios, junto

con la introducción de cenizas, también conducen a importantes modificaciones del sistema poroso de la roca, lo que puede causar una aceleración de las tasas de deterioro debido a que el aumento de poros de menor tamaño puede producir un mayor deterioro a causa de procesos relacionados con la humedad. La Sala de las Bóvedas de la torre de la Catedral de Salamanca no es un entorno propicio para la existencia de circulación de agua. Sin embargo, los procesos relacionados con la humedad pueden ser importantes en estructuras de este material quemadas y expuestas en entornos más agresivos. Además, los residuos de la combustión, en forma de cenizas y partículas sólidas, introducen nuevos iones en el sistema poroso, que en algunos casos podría conducir a la formación de sales en la piedra con su subsiguiente potencial de deterioro.

Al igual que en la arenisca de Uncastillo se puede inferir el rango de temperaturas en las que actuó el fuego a partir del análisis mineralógico. La temperatura fue mayor de 300 °C debido a la oxidación térmica del hierro y menor de 550 °C, ya que se observan trazas de paligorskita y esmectita. Sin embargo, el hecho de que estos minerales aparezcan muy dañados y estructuralmente modificados indica que la temperatura alcanzada estuvo cerca de este límite, con lo que se converge al valor de temperatura en torno a los 500 °C que se sugerían para los fuegos estudiados en la arenisca de Uncastillo. Esto es bastante lógico debido a que el tipo de combustible, que es un factor determinante en la temperatura máxima alcanzada, es bastante constante en este tipo de incendios.

La arenisca de Villamayor es un ejemplo de como el fuego puede producir un deterioro físico de los materiales a partir de un deterioro químico inicial. Así, el fuego no produce un daño físico de conjunto importante de manera instantánea en este material. Sin embargo, al producir un daño químico y una serie de cambios minerales, puede acelerar la tasas de deterioro de los materiales pétreos granulares a través de procesos de deterioro físicos como la disgregación granular y la descamación, produciendo daños de conjunto en un periodo de tiempo corto (pocos años).

## **11.2. Efectos del fuego en materiales pétreos competentes.**

Mientras que los efectos más importantes que se producen en los materiales detríticos granulares son los relacionados con los cambios químicos, en rocas más competentes mecánicamente, como por ejemplo las rocas graníticas, los efectos principales de un fuego se centran en la modificación estructural de la roca debido a la creación de fisuras.

Todos los materiales puestos en obra presentan un cierto grado de fisuración. Esta puede proceder tanto de procesos geodinámicos, como de los procesos industriales de extracción, corte, talla y acabado. Todo ello ha podido generar zonas de debilidad previas que son fundamentales para entender el comportamiento mecánico de la roca durante procesos de deterioro posteriores como puede ser el fuego, especialmente si consideramos modelos de rotura a partir de la evolución de microfisuras preexistentes basados en los criterios de Griffith (1921). Estos modelos se basan en que, en un material frágil con microfisuras orientadas aleatoriamente, los esfuerzos se concentrarán en las fisuras preexistentes siguiendo criterios de mínima energía potencial.

Durante el fuego se producen una serie de procesos que favorecen la generación de microfisuras o la propagación de fisuras preexistentes. El aumento de temperatura produce una concentración de esfuerzos internos inducidos por la anisotropía de la dilatación térmica (en el caso de agregados monominerales) o desajustes de la dilatación térmica (en el caso de rocas con más de una fase mineral), que se suman a los esfuerzos térmicos producidos por el gradiente de temperatura, que se producirían incluso en un sólido perfectamente homogéneo.

En los materiales granulares friables la matriz actúa de manera elástica como amortiguador de las dilataciones de los granos del esqueleto, evitando que entren en competencia las diferencias en la dilatación de los distintos minerales. Por el contrario, en los materiales densos desde el punto de vista del empaquetado de sus granos o cristales, no existe este fenómeno y los minerales son más sensibles a estas diferencias pues se encuentran más limitados en cuanto a su capacidad de dilatarse libremente.

Los materiales carbonáticos cristalinos son en la mayoría de los casos agregados monominerales de calcita o dolomita. En este caso la diferencia que existe entra la

dilatación según las direcciones cristalográficas va a ser uno de los factores principales (la calcita, por ejemplo tiene un coeficiente de expansión térmica, a temperatura ambiente, de  $26 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  en la dirección del eje c y de  $-6 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  en las direcciones a y b (Cermak y Rybach, 1982).

En las rocas ígneas, además de las diferencias de coeficientes de dilatación con la dirección cristalográfica, las temperaturas generadas en un fuego favorecen la transición de fase cuarzo  $\alpha$  a  $\beta$  a  $573 \text{ }^{\circ}\text{C}$  con el consecuente efecto dinámico (esfuerzo-deformación) que supone este cambio. A esto se suma la dilatación diferencial entre los diferentes granos minerales y su evolución con la profundidad debido al intenso gradiente térmico que se genera rápidamente en el seno de la roca.

Para evaluar el tipo de modificaciones que produce el fuego en este tipo de materiales se seleccionaron dos edificios de la Comunidad de Madrid (Figura 11.24) que habían sufrido la acción del fuego: el Palacio Arzobispal de Alcalá de Henares (S. XIII-XV) y el Castillo de la Coracera, en San Martín de Valdeiglesias (S. XIV-XV). El material dañado en el primero de ellos es la llamada Dolomía de Redueña y corresponde la balaustrada situada en la cornisa del edificio. En el segundo edificio, el material dañado fue un granito de la sierra de Guadarrama que formaba parte de una chimenea. Estos tipos de roca son representativos de dos grandes grupos de rocas competentes y además son dos materiales de construcción muy representativos en la Comunidad de Madrid.

Se denomina de forma general como “dolomía de Redueña” o “calizas de Redueña” a los materiales extraídos de los afloramientos de la orla cretácica del Sistema Central en el Norte – Noreste de la Comunidad de Madrid. Este material se ha usado en edificios patrimoniales del norte de la Comunidad de Madrid desde al menos en época romana (p.ej. el Puente Romano de Talamanca del Jarama) y es uno de los materiales pétreos que forma parte del grupo de los materiales tradicionales de la ciudad de Madrid, usándose entre los siglos XIV y XVII hasta que fue desplazada por la caliza de Colmenar (Menduiña et al., en prensa).

El granito de la sierra de Guadarrama, llamado *Piedra Berroqueña*, es el material pétreo de construcción más importante en la zona central de la Península Ibérica y el que presenta una mayor constancia en su utilización en la historia de la arquitectura. Este término incluye diversas composiciones de granitoides que van desde granodioritas

y monzogranitos a leucogranitos que se han extraído en diversos sectores de la sierra a lo largo de toda la historia y que continúan siendo una de las explotaciones más importantes de la Comunidad de Madrid.



**Figura 11.24:** Vista de las zonas de muestreo. Cornisa del Palacio Arzobispal de Alcalá de Henares (a) y mampostería en el Castillo de la Coracera en San Martín de Valdeiglesias (b), ambos en la provincia de Madrid.

La cantidad de muestra se redujo lo máximo posible, de tal manera que todos los ensayos en la dolomía del Palacio Arzobispal se realizaron sobre una muestra consistente en un único bloque de unos 15 x 5 x 5 cm que incluía zona quemada y zona sana. Así mismo, los ensayos sobre el granito del Castillo de la Coracera se hicieron sobre una muestra también única de aproximadamente 2 x 3 x 4 cm.

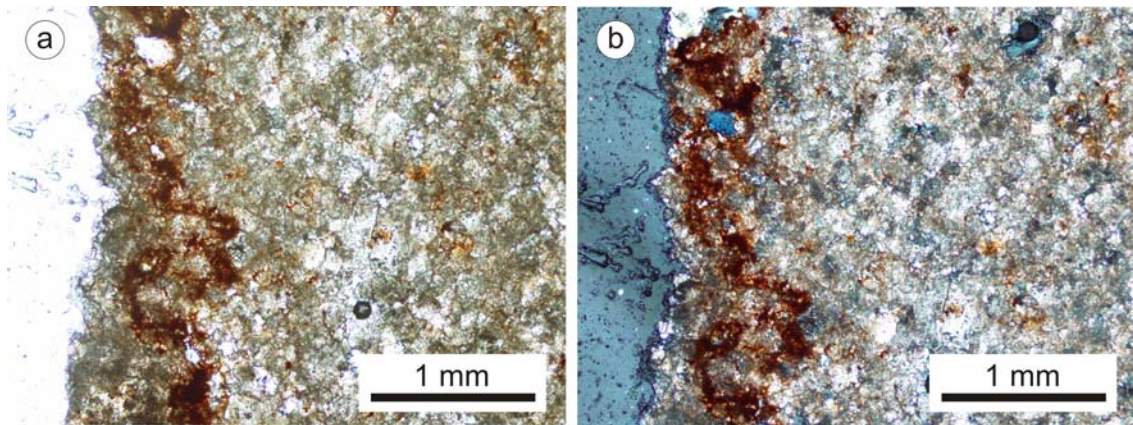
Las técnicas analíticas utilizadas fueron las mismas, descritas en el apartado anterior, que se utilizaron con las areniscas, aunque no se realizó difracción de la fracción arcilla. En este caso se realizó mayor hincapié en las técnicas microscópicas que permiten diferenciar y cuantificar familias de fisuras por su génesis y evolución. Los ensayos dinámicos directos o indirectos (ultrasonidos) generalmente usados para estudiar la evolución mecánica del material no permiten obtener resultados sobre la génesis de las fracturas, por lo que en este caso no se han utilizado, al ser el objetivo principal el estudio de los sistemas de fisuración desde un punto de vista genético y no como índice de calidad de la roca.

Para el análisis de la fisuración se ha utilizado microscopía de polarización (Zeiss axioscop), microscopía de fluorescencia con microscopio *Olympus U-RFL-T* con iluminación ultravioleta, sobre láminas delgadas embutidas en resina impregnada en fluoresceína, y microscopía electrónica de barrido tanto en modo de electrones

secundarios (SEM-SE) como en modo de electrones retrodispersados (SEM-BE). En el caso del granito sobre las fotomicrografías se realizó un análisis de imágenes mediante el software *UTHSCSA Image Tool 2.00* con el objetivo de cuantificar la densidad de fracturas y su orientación en función de su carácter intergranular, intragranular o transgranular.

### 11.2.1. Efectos del fuego en dolomías cristalinas (Dolomía de Redueña).

La Dolomía de Redueña es una dolomía cristalina sin texturas deposicionales (figura 11.25) constituida por mosaicos de cristales euhedrales de dolomía de un tamaño medio de 0,1 mm, que en ocasiones se observan zonados. Como se advierte en muestra de mano (Figura 11.26), el material, que de partida es de color ocre, torna a colores rosados al quemarse y presenta fracturas importantes subparalelas a la superficie externa.

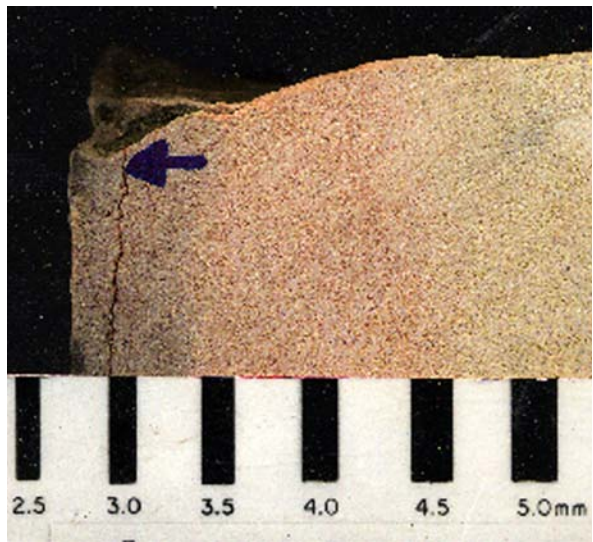


**Figura 11.25:** Fotomicrografías petrográficas de dolomía de Redueña. Nícoles paralelos (a) y nícoles cruzados (b). La zona a la izquierda de las imágenes, con tonos más oscuros corresponde a la zona exterior quemada de la muestra.

La secuencia observada en corte muestra una capa superficial negruzca de cenizas a la que sigue una capa de color rosado. En la zona más somera de esta capa de cambio de color se observa una zona más ennegrecida de unos 0,5 cm que indica que ha existido una intrusión de residuos de combustión como ocurría en el caso, anteriormente descrito, de la arenisca de Villamayor. El tránsito de la capa afectada por el fuego, de



unos 2 cm, a la roca sin afectar por el fuego es bastante gradual a diferencia de lo observado en los casos estudiados de las areniscas. Las mediciones del color de las zonas y su variación se incluyen en la tabla 11.7.



**Figura 11.26:** Muestra de dolomía de Redueña quemada del Palacio Arzobispal de Alcalá de Henares.

Las formas de deterioro que se observan en las zonas afectadas por el fuego incluyen el cambio de color y la aparición de desplazados de unos 0,25 – 0,5 cm a partir de fracturas subparalelas a la superficie. La orientación de estas fracturas y la presencia de residuos de combustión intersticiales en las mismas son criterios para considerar estos desplazados singenéticos con respecto al incendio y por tanto causados por él.

La observación petrográfica no muestra grandes diferencias entre la zona quemada y la sana (figura 11.25). Se observa un oscurecimiento de los cristales en la zona quemada, producto de la oxidación térmica del hierro y pequeñas partículas de material oscuro que corresponden a residuos de combustión introducidos en los poros. También se aprecian un pequeño aumento de la fisuración en los cristales de la zona quemada.

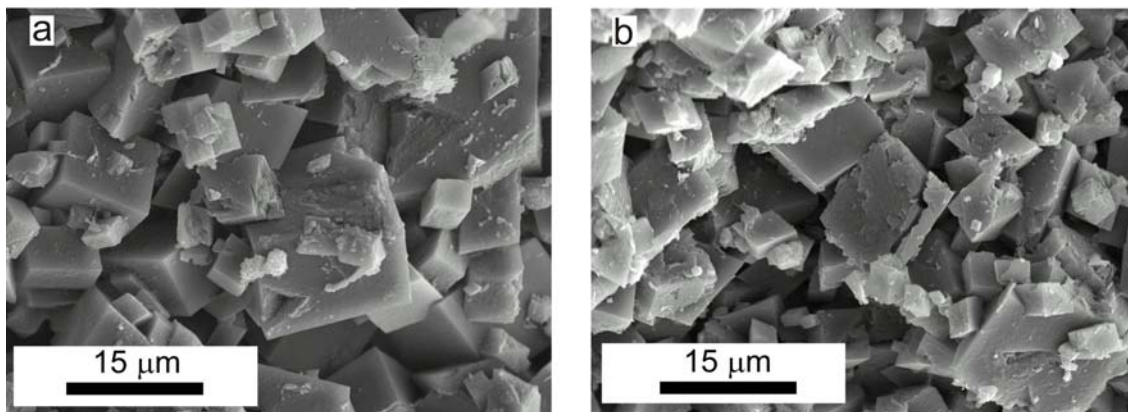
**Tabla 11.7:** Color y cambio de color en la dolomía de Redueña

	L*	a*	b*	WI	YI
Zona sana	78 ± 3	2,8 ± 0,5	14,3 ± 0,7	1 ± 2	24 ± 1
Zona rosa	74 ± 2	6,7 ± 0,5	13,9 ± 0,6	0 ± 2	25 ± 1
Zona negra	65 ± 4	3,7 ± 0,8	10,5 ± 0,8	5 ± 3	21 ± 2
	$\Delta E^*$			$\Delta WI$	$\Delta YI$
Sana-rosa	5,4			1	1
Sana-negra	13,6			4	3

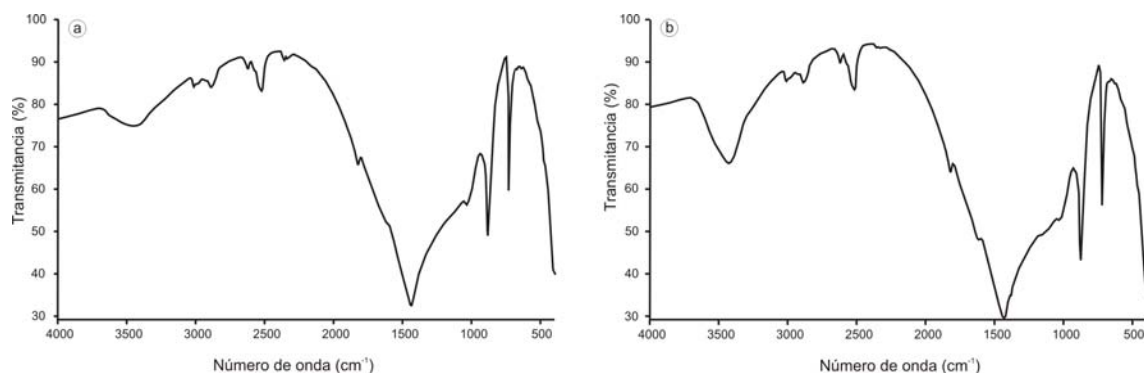
La microscopía electrónica muestra resultados similares (Figura 11.27). La superficie de los cristales de dolomía quemados aparece modificada, principalmente debido a un proceso de fisuración a favor de planos de exfoliación. Esto da lugar a morfologías en los cristales que recuerdan a los cristales “hopper” de la halita. Se observa también la



presencia de residuos de combustión en forma de corpúsculos depositados en la superficie de los cristales. En general los cristales no aparecen dañados en volumen y sólo una pequeña proporción de cristales aparece con fisuras transgranulares. La observación de la distribución del hierro con electrones retrodispersados tampoco arroja ningún dato en cuanto a variaciones en la distribución de este elemento por lo que no se ha producido ningún fenómeno de migración del hierro.



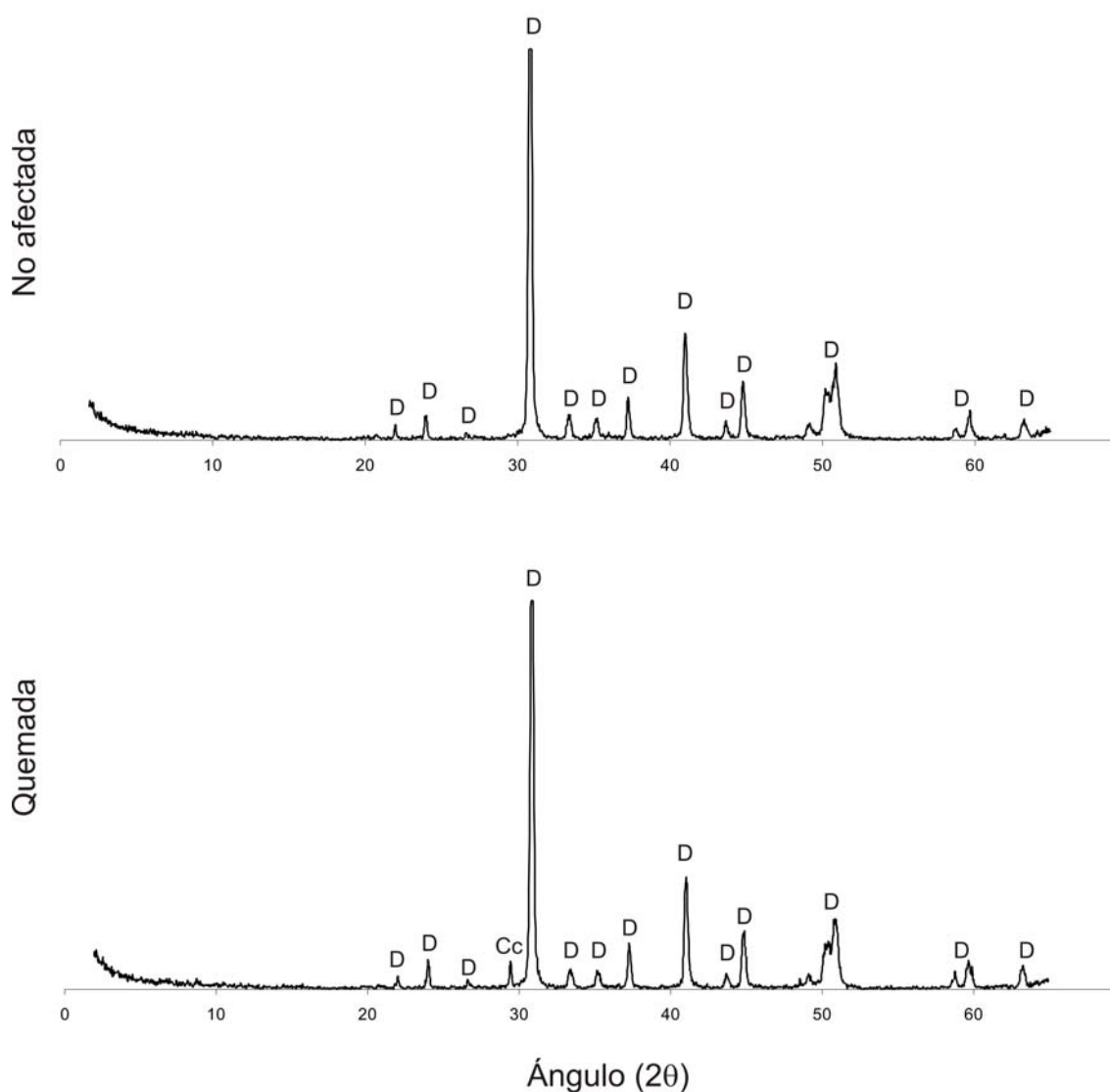
**Figura 11.27:** Imágenes de SEM-electrones secundarios de muestras de dolomía de Redueña inafectada (a) y afectada (b) por el fuego.



**Figura 11.28:** Espectros de infrarrojos de dolomía de Redueña inafectada (a) y afectada (b).

Los resultados los espectros de infrarrojos (Figura 11.28) así como de difracción de rayos X (Figura 11.29) muestran que el fuego no induce ninguna modificación mineralógica en este material. En el difractograma de la zona quemada aparece el pico principal de la calcita con muy baja intensidad, pero esto no se debe a ningún proceso relacionado con el fuego sino a la presencia de calcita como muy accesoria en la

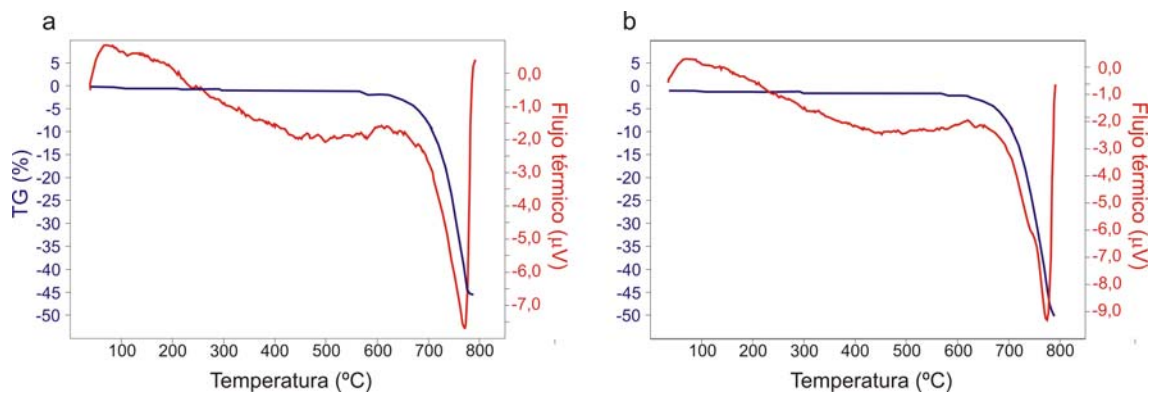
muestra. Esto no se debe considerar de forma Con respecto a los análisis termogravimétricos (Figura 11.30), tampoco se observa ninguna variación producida por el fuego.



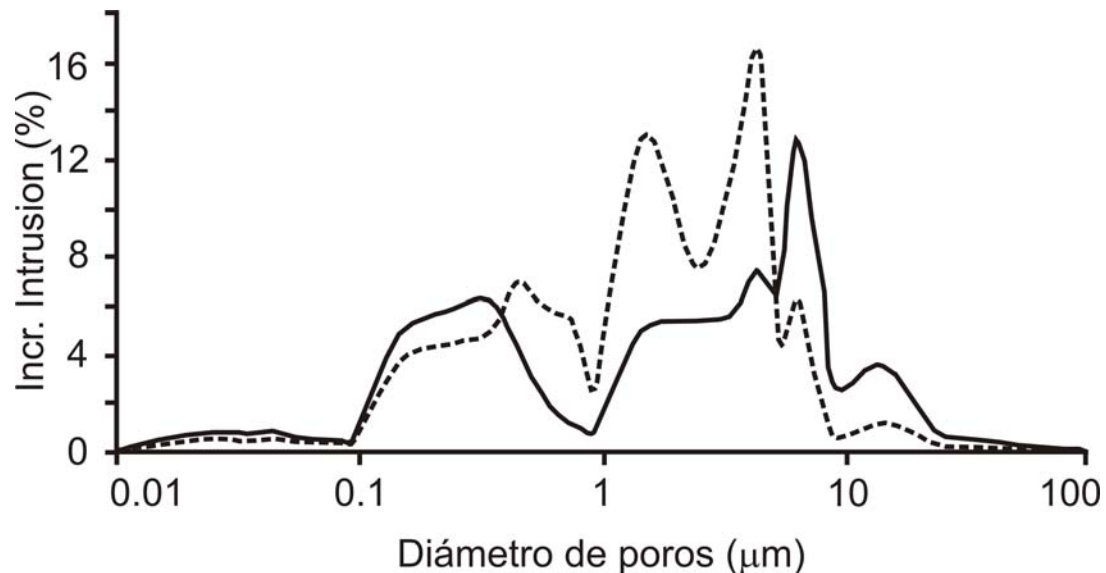
**Figura 11.29:** Difractogramas de dolomía de Redueña. Dolomita (D), Calcita (Cc).

La porosidad total de la muestra aumenta ligeramente (Tabla 11.8) y la distribución varía en cuanto a la importancia relativa de los picos (Figura 11.31). Al comparar ambas distribuciones de la porosidad se observa que los picos de porosidad de tamaño mayor a 1  $\mu\text{m}$  se mantienen y sólo existe una deriva en la microporosidad menor de 1  $\mu\text{m}$ . Los picos principales de la distribución se sitúan a 0,3 1,5 (se observa como un hombro de la

distribución) 4,5 6,5 y 15  $\mu\text{m}$  en la muestra sana. Los picos a mayores tamaños (6,5 y 15  $\mu\text{m}$ ) disminuyen proporcionalmente su importancia y el pico de 0,3  $\mu\text{m}$  sufre una deriva hacia tamaños ligeramente mayores (0,45  $\mu\text{m}$ ). Los picos de 1,5 y 4,5  $\mu\text{m}$  aumentan su importancia relativa. Esto indica que las fisuras generadas en el material convergen en los tamaños de poros intermedios (1 – 5  $\mu\text{m}$ ) aumentando en general la proporción de microporos (< 5  $\mu\text{m}$ ) en detrimento de la macroporosidad (> 5  $\mu\text{m}$ ).



**Figura 11.30:** Curvas TG (azul) y DSC (rojo) de la dolomía de Redueña inafectada (a) y afectada (b).



**Figura 11.31:** Distribución de la porosidad en la dolomía de Redueña inafectada (línea continua) y afectada (línea de trazos) por el fuego.

**Tabla 11.8:** Datos de Porosimetría de Intrusión de Mercurio para muestras de dolomía de Redueña.

	<b>Inafectada</b>	<b>Afectada</b>
<b>Porosidad (%)</b>	22,2	23,6
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,18	2,14
<b>Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,81	2,80
<b>Área de poros (m<sup>2</sup>/g)</b>	1,00	0,81
<b>Mediana del tamaño de poros (μm)</b>	0,07	0,19
<b>Media del tamaño de poros (μm)</b>	0,40	0,54

La medida del contenido en hierro (Tabla 11.9) muestra la tendencia normal en la que el ratio  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  aumenta tras el fuego, lo que es un reflejo de la oxidación térmica del hierro que se expresa en la variación cromática del material.

**Tabla 11.9:** Datos de contenido en hierro ferroso y férrico en dolomía de Redueña.

	<b>FeO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO</b>
No afectada	0,32	0,09	0,28
Quemada	0,19	0,26	1,36

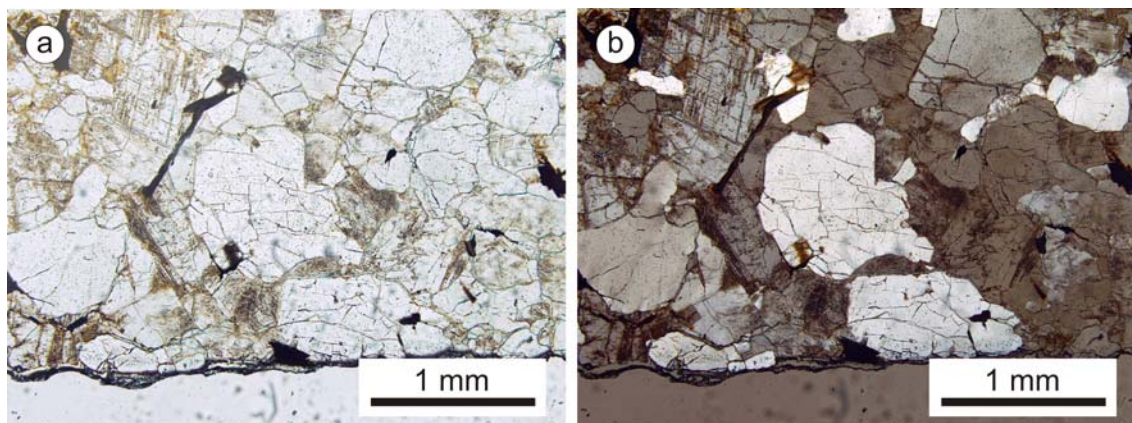
En resumen, la dolomía de Redueña es un material muy resistente al fuego en términos microestructurales. El fuego no produce variaciones mineralógicas, debido fundamentalmente a la ausencia de minerales susceptibles de cambios térmicos en el rango de temperaturas que se suele producir en incendios en edificios. Tampoco se produce una modificación importante de las texturas y la disrupción mecánica es mínima a nivel cristalino. La existencia de una porosidad relativamente alta produce una amortiguación de la expansión térmica dado que los granos pueden dilatarse a favor de los poros sin que exista un desplazamiento (Weiss et al., 2004). La ausencia de una orientación preferencial en los cristales (como ocurre en algunos mármoles) no favorece el desarrollo de fisuras transgranulares que pudieran derivar en un mayor deterioro mecánico del material. Por lo tanto, aunque en el edificio se observaron fenómenos de desplacado, se puede concluir que este material en general resiste mecánicamente los efectos del aumento de temperatura producido en un fuego. La existencia de estos desplacados se puede justificar por la posible existencia de planos de debilidad estructural previos al episodio de fuego. Esto subraya la importancia de la historia previa de deterioro que haya sufrido el material para evaluar la repercusión que un agente puntual como el fuego puede tener en el conjunto del deterioro de un material

pétreo (La importancia de esta consideración se ha discutido más ampliamente en el apartado 10.2.1 de esta tesis).

Por otro lado, el fuego produce efectos en este material que pueden tener consecuencias importantes con respecto a ulteriores procesos de deterioro. Así por ejemplo, la modificación que se introduce en la porosidad en la que la proporción de microporos ( $< 5 \mu\text{m}$ ) aumenta drásticamente, puede agravar los procesos de deterioro relacionados con la humedad, ya que los tamaños de poro pequeños favorecen la condensación, el ascenso capilar, etc. (Fort, 1996).

### 11.2.2. Efectos del fuego en rocas graníticas (Granito de Guadarrama).

El granito que forma parte de la zona estudiada del Castillo de la Coracera es un leucogranito equigranular panalotriomorfo de grano fino. Los minerales principales son cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico y los accesorios principales biotita y apatito. Se observan texturas peritéticas en el feldespato y es muy abundante la alteración sericítica del mismo (Figura 11.32).



**Figura 11.32:** Fotomicrografías petrográficas de granito de Guadarrama. Nícoles paralelos (a) y nícoles cruzados (b).



**Figura 11.33:** Muestra de leucogranito del Castillo de la Coracera.

En muestra de mano (Figura 11.33) se observa un cambio de color que afecta a los primeros milímetros de material. Sin embargo, la diferencia existente entre la zona externa y el interior es más gradual que en las otras litologías estudiadas. Se puede identificar la capa exterior con residuos de combustión que como es habitual es de tamaño micrométrico y una zona en la que se ha producido algo de oxidación

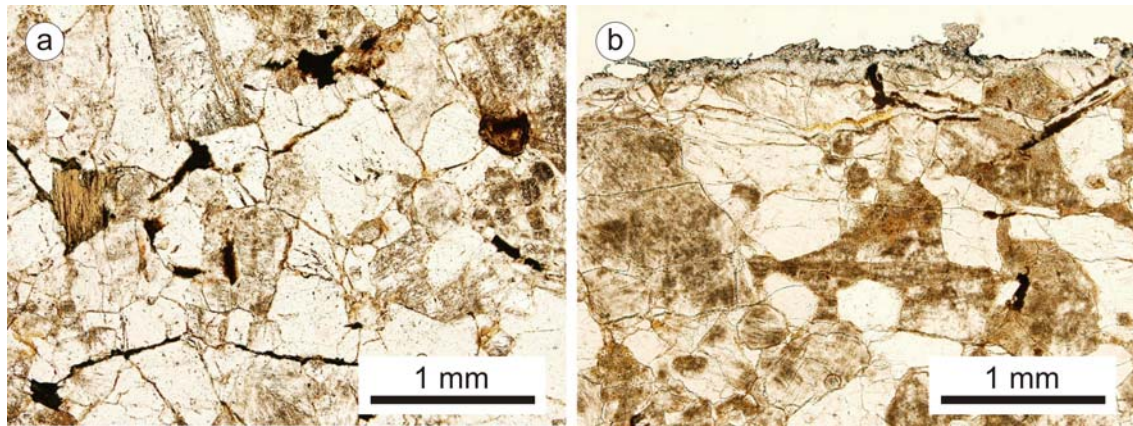
térmica y en la que el material torna a tonos castaños. Las medidas de color se incluyen en la tabla 11.10. No se observa una capa intermedia con cenizas intersticiales como ocurría en los otros materiales debido a que la baja porosidad de este material no permite la introducción de estos residuos de combustión.

**Tabla 11.10:** Color y cambio de color en el granito de Guadarrama

	L*	a*	b*	WI	YI
Zona sana	51 ± 3	8,0 ± 1,0	14,7 ± 0,8	-7,0 ± 1,0	34 ± 1
Zona quemada	43 ± 1	6,4 ± 0,4	12,2 ± 0,3	-4,2 ± 0,4	33 ± 1
	$\Delta E^*$			$\Delta WI$	$\Delta YI$
	9,2			2,8	1

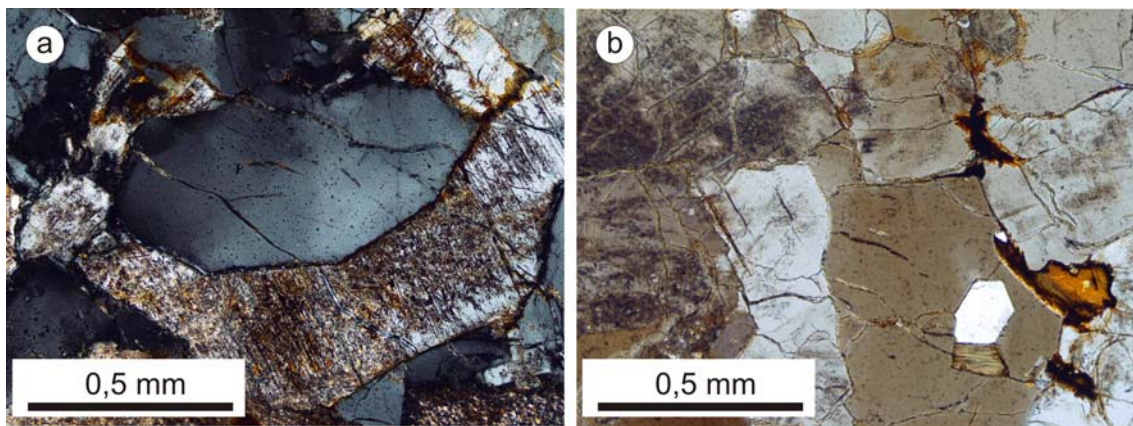
En el microscopio petrográfico (Figura 11.34) se observa que la zona exterior del material está notablemente más fisurada que el interior, destacando la aparición de fisuras grandes subparalelas a la superficie del material. En la zona quemada los granos minerales, especialmente los de feldespatos (tanto feldespato potásico como plagioclasa), aparecen muy fisurados. La fisuración aprovecha planos de exfoliación, zonas alteradas (sericitadas) o inclusiones. En el caso del cuarzo, la fisuración tiene morfología muy irregular. La biotita aparece sin fisuras abiertas pero con los planos de exfoliación basal más definidos.





**Figura 11.34:** Fotomicrografías de granito de Guadarrama inafectado (a) y afectado por el fuego (b).  
Nícoles paralelos

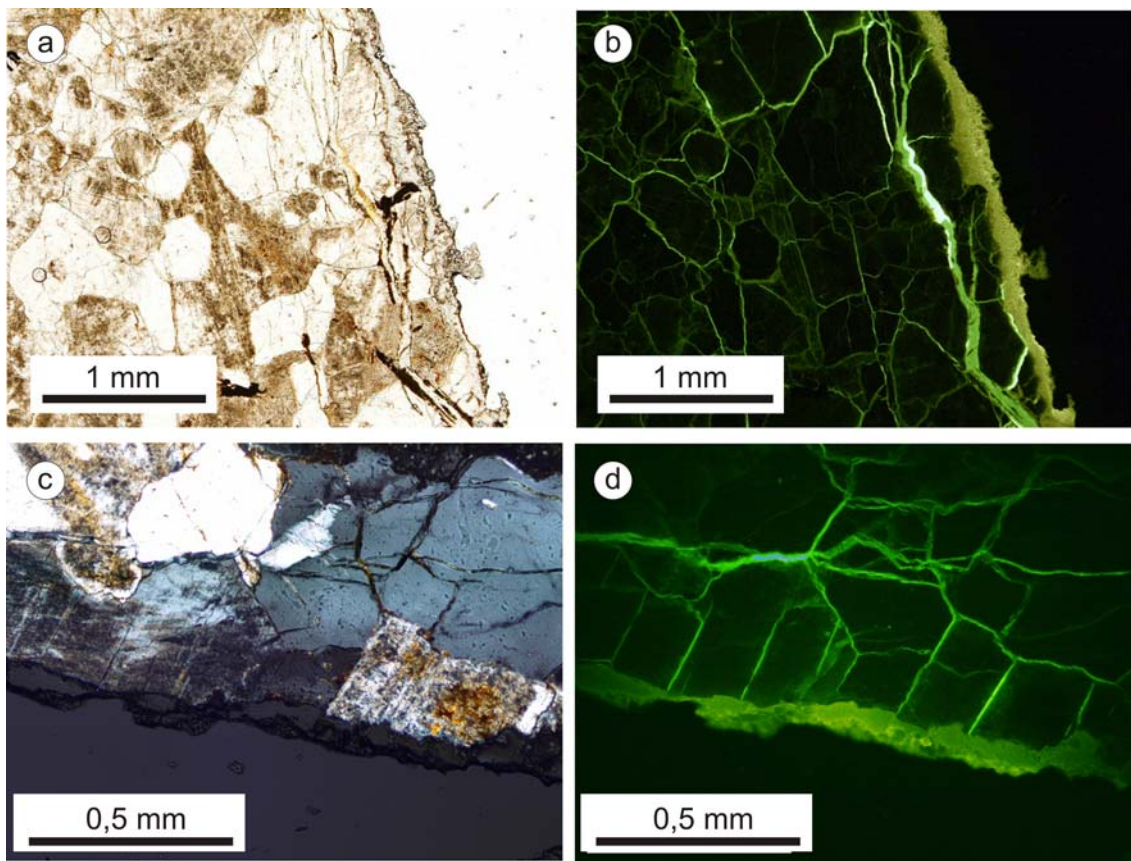
Los feldespatos que en la zona no quemada presentan alteraciones (sericitizaciones principalmente), en la zona quemada aparecen con aspecto anubarrado, posiblemente debido a pequeños contenidos de hierro sustituidos en la estructura de las micas (Figura 11.35a) que se han oxidado térmicamente. Las fisuras aparecen rellenas por óxidos de hierro. La biotita presentan también un oscurecimiento notable llegándose a opacizar en algunos casos. En otros casos, aparece en la biotita una orla de reacción que es más opaca o presenta un pleocroismo diferencial entre la zona externa y la zona interna del mineral (Figura 11.35b).



**Figura 11.35:** Fotomicrografías de granito de Guadarrama quemado. Oscurecimiento de feldespatos potásicos alterados con nícoles cruzados (a) y de biotitas con nícoles paralelos (b).

La microscopía de fluorescencia de las láminas delgadas realizadas a partir de muestras impregnadas con resina con fluoresceína permite realizar un análisis más detallado de la fisuración de la roca al obtenerse imágenes binarias donde destacan las fisuras sobre el conjunto homogeneizado de los granos minerales. Así, en la figura

11.36 se observa como en la zona externa del material aparecen tres tipos de fisuras en el seno del material: Fisuras intergranulares (aquellas que se producen en la interfase de dos granos minerales), fisuras intragranulares (que son las que afectan a un único grano mineral seccionándolo) y fisuras transgranulares (la combinación entre los tipos anteriores). Estas últimas son las más importantes para procesos como el desplazado, debido a que son fisuras importantes que producen planos a partir de los cuales se pueden desprender fragmentos completos de material. Las fisuras inter e intragranulares tienen más trascendencia para procesos de deterioro tipo disgregación granular, al descohesionar los distintos componentes individuales de la roca.



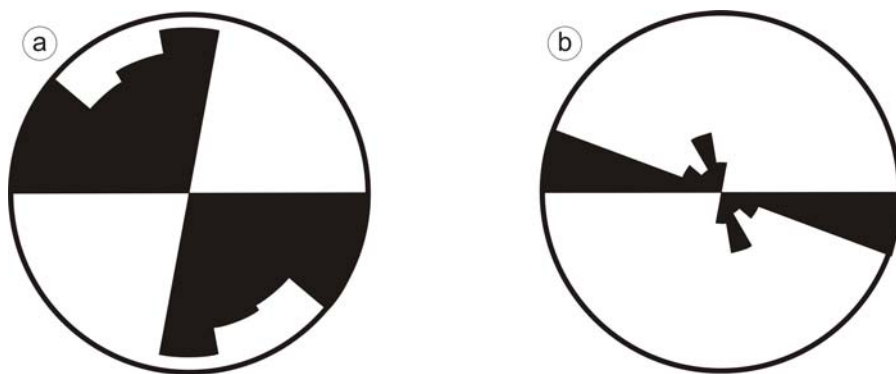
**Figura 11.36:** Fotomicrografías de granito de Guadarrama quemado con microscopio de fluorescencia. Las imágenes a y c muestran el aspecto del granito con nicoles paralelos y cruzados, respectivamente. El equivalente de estas imágenes con luz fluorescente (b y d) destaca el sistema de fisuras de la roca en la zona más cercana a la superficie.

Las disrupciones de la estructura del material más importantes corresponden a las fisuras transgranulares que se sitúan subparalelas a la superficie afectada del material. Le siguen en importancia relativa, en cuanto a la apertura de las misma, las fisuras



intergranulares e intragranulares en este orden. Sin embargo la diferencia entre estos dos tipos, en lo que se refiere a entidad de las fisuras, no es tan notable.

La medida de la orientación de las fisuras realizada sobre 200 fisuras en una serie de imágenes de las zonas quemadas y sin quemar (Figura 11.37) muestra que mientras que en las zonas sin quemar la distribución de las discontinuidades del material es aproximadamente isótropa, en la zona quemada existe una preponderancia de las direcciones paralelas o subparalelas a la superficie afectada.



**Figura 11.37:** Diagramas de rosa de las fisuras del granito en la zona no quemada (a) y quemada (b). La horizontal del diagrama corresponde a la superficie de la muestra a partir de la cual están medidos los ángulos. Los ángulos se midieron en el arco menor entre superficie y fractura, siendo el máximo valor de medida 90°. El tamaño de las clases es 20° y el gráfico está construido representando las proporciones en longitud y no en área.

Aparece también un sistema de fisuras aproximadamente subverticales (clase del diagrama entre 60 y 80°) que es el segundo en importancia, aunque en muy pequeña proporción comparado con el sistema principal. Estas fisuras, que son tanto más abundantes cuanto más nos acercamos a la superficie, pueden tener dos orígenes. Por un lado pueden ser fisuras conjugadas con el sistema de fisuras subparalelo a la superficie. Por otro lado existe una tendencia natural a la mayor estabilidad en la superficie de los granos minerales limitados por bordes de grano perpendiculares a la misma (si los bordes de un grano mineral en la superficie de la roca presentan muy bajo ángulo con la misma estos tenderán a disgregarse con mayor facilidad). En la superficie es donde más inciden los procesos de fisuración debido a que las diferencias térmicas son mayores y las diferencias que pueda haber en las dilataciones se magnifican, y los bordes de grano son las zonas de fisuración más probables debido a que la energía interfacial es mucho menor que en el interior del mineral (se calcula que unas 0,4 veces la resistencia a la

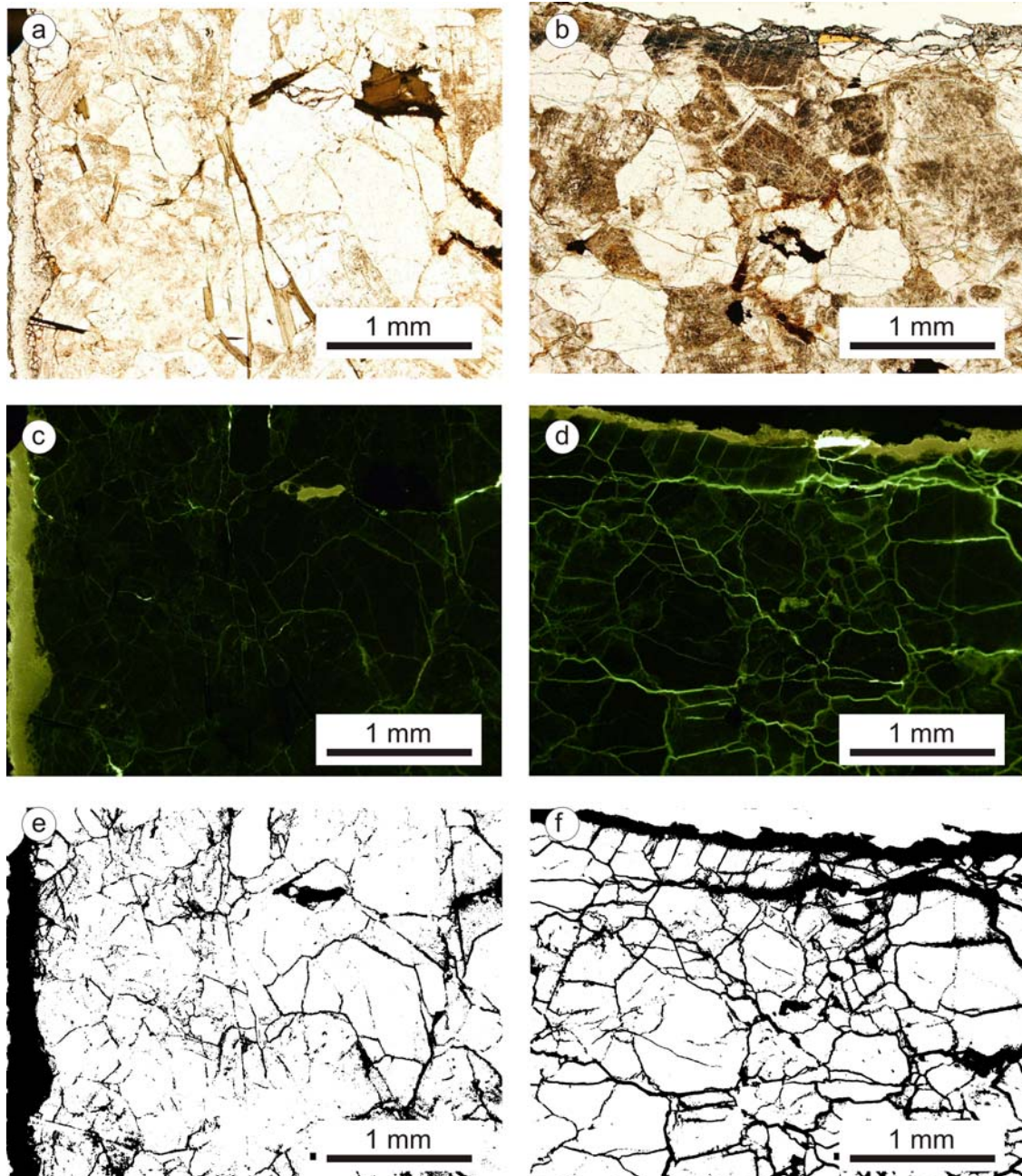
fractura de conjunto en los granos (Yang et al., 1990; Sridhar et al., 1994; Zimmermann et al., 2001; Weiss et al., 2002). Por tanto esta segunda familia de fisuras subverticales responde también a este fenómeno por el cual se ve favorecida la apertura de los bordes de granos perpendiculares a la superficie en los minerales más externos de la muestra.

La obtención de imágenes en una única gama de color permite realizar un tratamiento informático de las mismas para obtener otros datos sobre el sistema de fisuración. La figura 11.38 muestra el proceso para la obtención de imágenes binarias a partir de muestras impregnadas con fluoresceína. Estas imágenes binarias se han obtenido transformando las de fluorescencia mediante un programa de tratamiento de imagen en imágenes de escala de grises. Se obtiene el histograma de distribución de las imágenes de escala de grises y se establece un umbral que separe el fondo y el elemento que se quiere cuantificar (las fisuras en este caso). En este caso se selecciono un umbral del 25 %, lo que quiere decir que los tonos de gris situados por debajo del 25 % de negro se asignan al blanco, mientras que el resto de la distribución se asigna al negro. De esta forma se obtienen las imágenes binarias de la figura 11.38e y f. Una vez que se obtiene la imagen binaria se calcula el número de píxeles asignados al negro y al blanco, y se calcula la proporción.

Los resultados obtenidos sobre cuatro imágenes, para cada una de las áreas quemadas y sin quemar, indicaron que en las zonas sanas la superficie ocupada por las fisuras supone un  $9 \pm 2$  % de la sección total, mientras que en las zonas quemadas la fisuración alcanza el  $25 \pm 7$  % de la superficie total.

Las observaciones con microscopio electrónico, tanto sobre muestras en fragmento como en láminas delgadas, permitieron analizar en detalle la morfología de las fisuras en cada uno de los minerales y distinguir los tipos de fisuras (inter, intra, y transgranulares) del material.

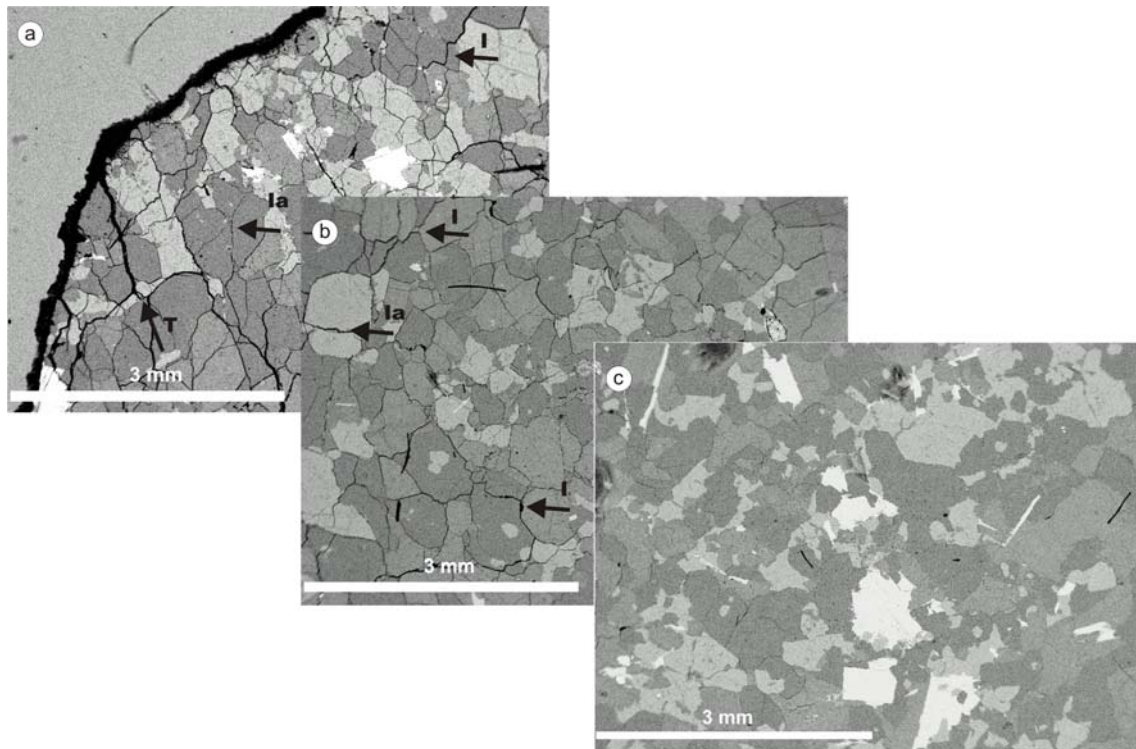
De manera general, se detecta una tendencia en la cual en las zonas más externas (aproximadamente el primer medio centímetro) se observan los tres tipos de fracturas intergranulares, intragranulares y transgranulares. A medida que se profundiza en la muestra desaparecen las fisuras transgranulares (a partir de 0,5 cm) y posteriormente las fisuras intragranulares (a partir de aproximadamente 1 cm de profundidad). A partir de 1,5 cm desde la superficie no se observan fisuras (Figura 11.39).



**Figura 11.38:** Fotomicrografías de granito de Guadarrama sin quemar (a, c y e) y quemado (b, d y f), mostrando el proceso desde la imagen tomada con microscopio petrográfico (a y b, nicols paralelos), pasando por la imagen de fluorescencia (c y d), hasta la obtención de una imagen binaria pura (e y f) a partir del establecimiento de un umbral.

Esta tendencia se debe a la mayor energía necesaria para que se produzcan las fracturas intergranulares, y por tanto las transgranulares. De tal manera, en las zonas exteriores, el gradiente de temperatura es mucho mayor tanto con respecto al tiempo como en el perfil de distribución de las temperaturas y los procesos de dilatación producen esfuerzos suficientes para la rotura de los granos. En zonas más internas disminuye tanto el gradiente espacial de temperaturas (por la atenuación debida a la baja

conductividad de los materiales pétreos como se veía en los primeros capítulos de esta tesis) así como el aumento absoluto de temperatura que se produce durante el incendio. Por tanto, en estas zonas más internas los esfuerzos debidos a la dilatación no son suficientes para que se produzcan fisuras en el interior de los granos, pero son suficientes para que se fisuren las uniones intergranulares, cuya resistencia a la rotura es mucho menor que la resistencia a la fractura de conjunto en los granos minerales.



**Figura 13.39:** Imágenes de SEM (electrones retrodispersados) de granito de Guadarrama desde las zonas externas (a) donde se observan fisuras intergranulares (I), intragranulares (Ia) y transgranulares (T). A medida que se profundiza en el material la presencia de fisuras transgranulares e intragranulares disminuye (b), para luego desaparecer también las intergranulares a partir de 1,5 cm de profundidad (c).

Como discuten Fredrich y Wong (1986) las medidas numéricas en plano de fracturas a lo largo de perfiles de un sólido con una distribución isótropa de sus granos pueden relacionarse con el área superficial de las fisuras en un volumen de roca. La expresión que relaciona el número de fisuras por unidad de longitud ( $P_L$ ) con la superficie de fracturas por unidad de volumen ( $S_V$ ) es:

$$S_V = 2 P_L$$

Para realizar este cálculo se tomaron 15 perfiles perpendiculares a la superficie del material espaciados 0,125 mm entre ellos en imágenes de microscopía electrónica en modo de electrones retrodispersados para facilitar la diferenciación entre granos minerales. Se tomo por un lado 15 perfiles correspondientes al primer medio centímetro de profundidad de la muestra, y por otro lado 15 perfiles correspondientes a una zona interna no afectada por el fuego. Las fisuras transgranulares se computaron como un carácter adicional al de inter o intragranular, por tanto el  $P_L$  total para el cálculo de  $S_V$  es la suma de  $P_L$  para fracturas inter e intragranulares. Los datos de la densidad de fracturas se incluyen en la tabla 11.11.

**Tabla 11.11:** Datos de densidad de fisuras en granito de Guadarrama.

	$P_L$ intergranular	$P_L$ intragranular	$P_L$ transgranular	$S_V$ total
Área no afectada	$1,0 \pm 0,3 \text{ mm}^{-1}$	$0,6 \pm 0,3 \text{ mm}^{-1}$	$0,7 \pm 0,7 \text{ mm}^{-1}$	$3,2 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$
Área quemada	$2,2 \pm 0,9 \text{ mm}^{-1}$	$4,0 \pm 1,0 \text{ mm}^{-1}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ mm}^{-1}$	$13,2 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$

En lo referente a la formación de las fisuras, se observan tres mecanismos de formación de estas: El ensanchamiento de discontinuidades preexistentes, como bordes de grano o planos de exfoliación; la propagación de fisuras y la nucleación de nuevas fisuras.

El ensanchamiento de las uniones intergranulares es el primer proceso en producirse debido a la menor energía que requieren estas superficies para romper y las uniones triples suelen ser puntos muy favorables para que comience la fisuración. En general se observa como la anchura de las fisuras intergranulares es mayor que la de las fisuras intragranulares. Las fisuras también pueden nuclear en poros o inclusiones. Ejemplos de estos tipos de nucleación se pueden observar en la figura 11.40a y c, donde entre otros procesos se observa como en el feldespató potásico marcado se generan fisuras desde las inclusiones y como el punto de unión entre los granos marcados de cuarzo, plagioclasa y feldespató potásico se generan fisuras en todas las uniones intergranulares correspondientes. La figura 11.40 g muestra la propagación de diversas fisuras a partir de los planos de exfoliación basal de la mica, estando marcadas con un flecha la dirección de propagación de las fisuras a partir del grano de biotita.

En la superficie la generación de fisuras intergranulares se produce en forma de cuña debido al gradiente térmico en perfil que se produce en la muestra. Esto se puede ver en

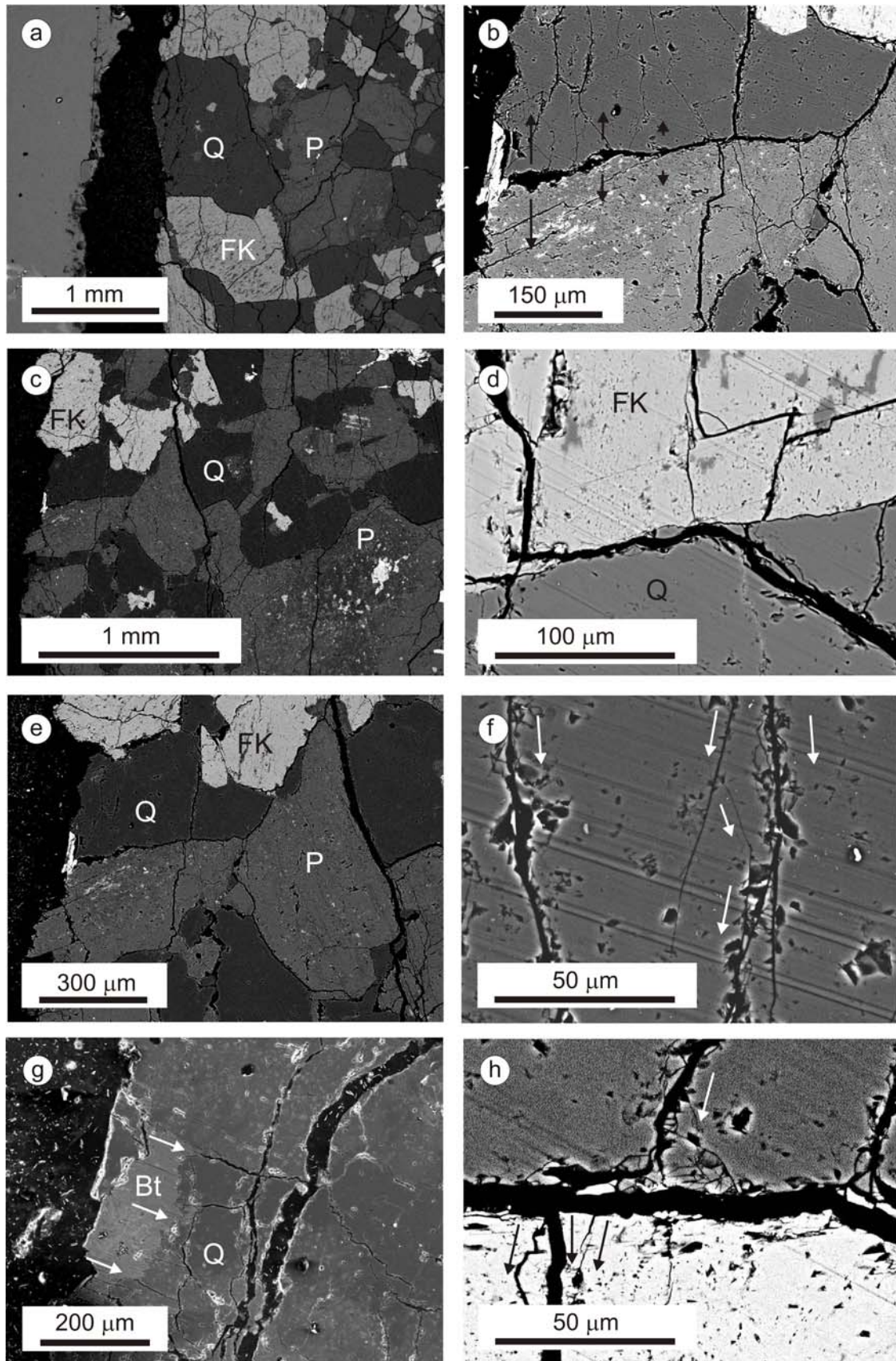


la figura 11.40b, donde se observa que las diferencias en la dilatación entre la parte más superficial y la subsuperficial provocan una fisura que se encuentra más abierta en la superficie que en el interior. Las fisuras se propagan de forma más o menos lineal hasta que interceptan otra discontinuidad, ya sea un borde de grano como otra fisura. A partir de ese momento la fisura puede detener o seguir su evolución. La figura 11.40d muestra la propagación de una fisura desde un grano de cuarzo hasta un borde de grano. Justo antes de llegar al borde de grano esta fisura se bifurca y su rama fina (a la derecha de la imagen) intercepta el borde de grano pero continúa su propagación. La rama gruesa a la izquierda, continúa también su propagación tras la intercepción con el borde de grano; sin embargo, al entrar en el feldespato, intercepta una nueva fisura de forma perpendicular y detiene su evolución. En esta imagen también se observa una fisura generándose en la esquina superior izquierda a partir de un poro en el feldespato potásico. La figura 11.40h muestra también un ejemplo de la evolución de una fisura al interceptar con un borde de grano.

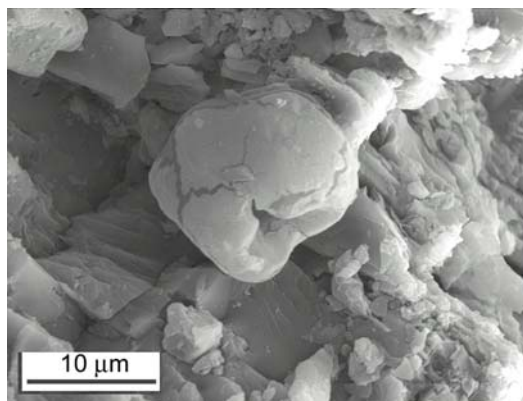
El principal criterio para definir en qué sentido ha evolucionado una fisura es la presencia de bifurcaciones o pequeñas barbas (pequeñas exfoliaciones o fracturas perpendiculares a la fisura principal). El sentido de evolución de una fisura coincide con el que forma menor ángulo con estas estructuras asociadas. La figura 11.40f muestra a partir de estos criterios el sentido de propagación de una fisura en un grano de cuarzo.

Con respecto a las relaciones entre fisuración intergranular y mineralogía, las fisuras intergranulares en los bordes entre el cuarzo y los feldespatos (tanto plagioclasa como feldespato potásico) son más frecuentes que en los bordes cuarzo – mica o mica – feldespato (Figuras 11.40a y c). La mica se comporta, como ya se ha mencionado, como un nucleador de fisuras muy efectivo. Las uniones intergranulares donde menor proporción de fisuras se observan son las feldespato – feldespato.

Las plagioclasa junto con el feldespato potásico son los minerales más sensibles a la fisuración intracrystalina. El cuarzo le sigue con mucho menos y las biotitas raramente aparecen fisuradas (si se exceptúan los planos de exfoliación, presentes también en el material sin quemar). Así en el caso de una fractura intragranular nucleada a partir de una fractura intergranular biotita – feldespato o cuarzo – feldespato, se observa que en la mayoría de las ocasiones esta evoluciona hacia el feldespato.



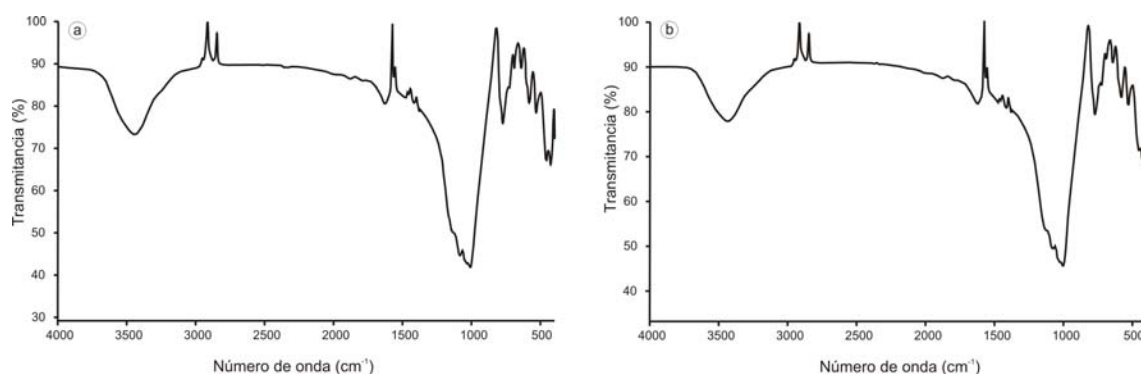
**Figura 11.40:** Imágenes de SEM (electrones retrodispersados) de granito de Guadarrama en las que se observan distintas morfologías de fisuras. Cuarzo (Q), plagioclasa (P), feldespato potásico (FK), biotita (Bt). Ver detalles en el texto.



**Figura 11.41:** Ceniza en leucogranito del Castillo de la Coracera.

Las observaciones de microscopio electrónico también muestran la presencia de residuos de combustión (cenizas) incluidos en las fisuras del material. Estas aparecen como gránulos redondeados (Figura 11.41) y presentan composiciones variadas incluyendo como elementos principales azufre, carbono, aluminio y silicio. Debido a la baja porosidad del material, su presencia en el interior no es tan abundante como en los materiales granulares poroso estudiados en el capítulo anterior y se circunscriben a las fisuras más superficiales del granito.

Con respecto a los análisis para detectar cambios en la mineralogía, los resultados muestran que las variaciones no son tan importantes como se observaba en las areniscas. La figura 11.42 muestra los análisis de espectroscopia de infrarrojos de la muestra en las zonas afectadas por el fuego y sin afectar, la figura 11.43 recoge los resultados de los análisis termogravimétricos y la figura 11.44 muestra los difractogramas obtenidos para la muestra sin quemar y quemada.



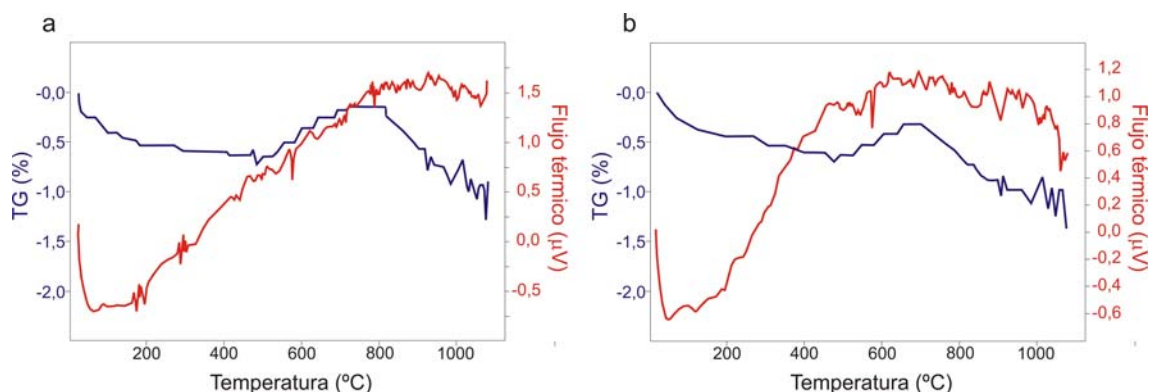
**Figura 11.42:** Espectros de infrarrojos del granito en la zona sin quemar (a) y quemada (b)

Como se observa en los espectros de infrarrojos no existen variaciones en los modos vibracionales. La difracción de rayos X principalmente muestra diferencias en lo que se refiere a la intensidad relativa de las micas y la plagioclasa. Además, en la zona quemada aparece un pequeño pico correspondiente a un espaciado de 15 Å, que correspondería a una mica de tipo montmorillonita o vermiculita. La variación de la proporción relativa entre plagioclasa y mica estaría relacionada con la sericitización de las plagioclasas. Aunque la zona no quemada presenta este proceso, como se observaba



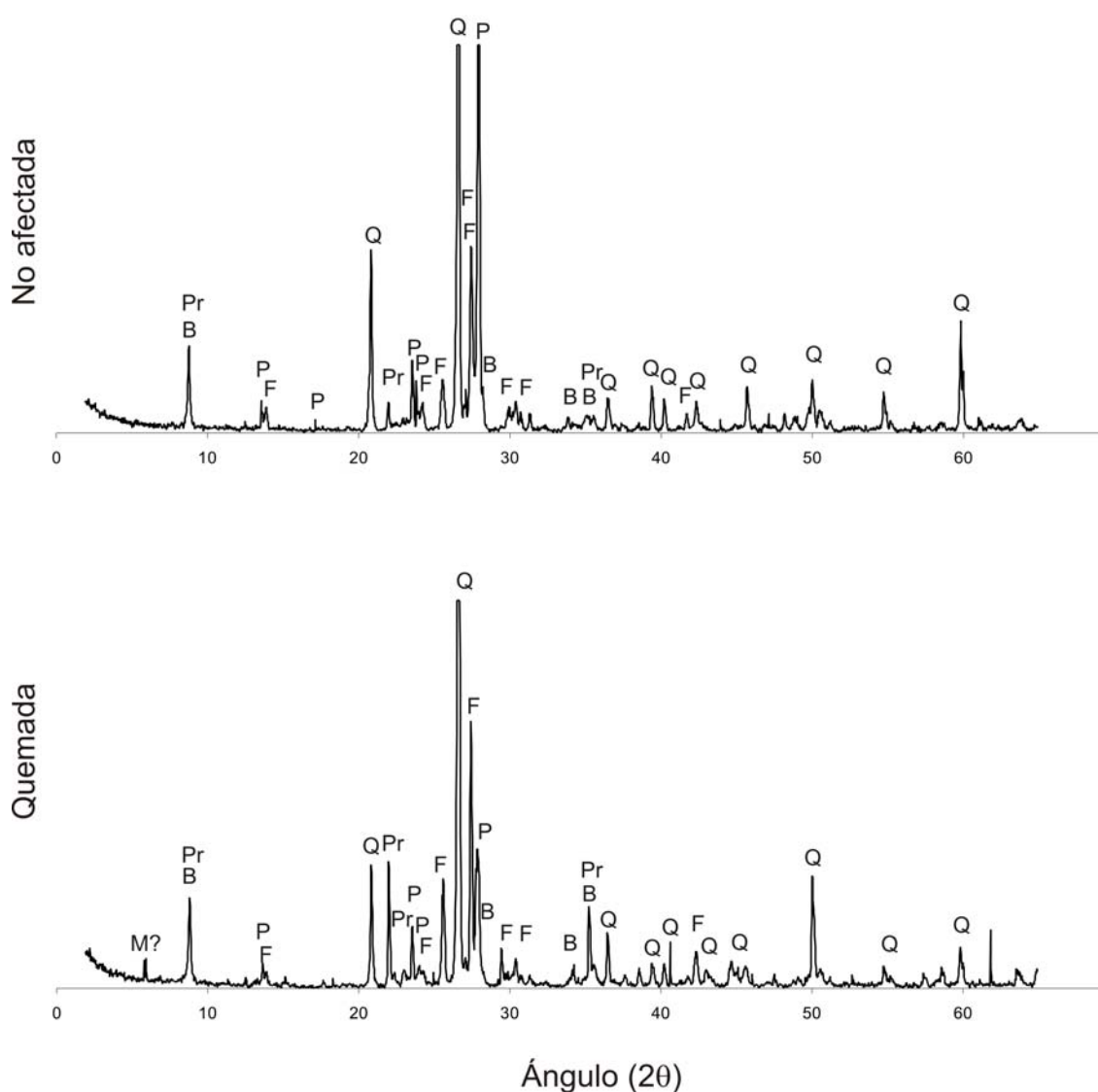
en la petrografía, este es más intenso en la zona quemada. Esto no ha de ser un producto de una reacción directamente ocurrida durante el fuego. Sin embargo, el fuego ha podido favorecer la generación de defectos en la estructura de las plagioclasas u otros procesos de distorsión químico – estructural. La presencia de texturas peritéticas induce a pensar que las plagioclasas son fundamentalmente sódicas estando cerca de la zona de posible solución sólida albita – ortosa. En las plagioclasas se produce una transformación desplazativa de una forma de baja temperatura  $C\bar{1}$  a una de alta temperatura  $C2/m$ . En el caso de una solución sólida albita – ortosa, esta transformación se puede dar a temperaturas relativamente bajas a medida que aumenta el contenido de potasio, llegando a temperaturas inferiores a 500 °C para contenidos molares de más del 20 % en feldespato potásico. Estas temperaturas son, como hemos venido viendo, bastante típicas de los fuegos normales. El aumento de temperatura y las consecuentes transformaciones estructurales, junto con el favorecimiento de otros procesos como pudiesen ser los de orden-desorden o desmezclas podrían hacer que las plagioclasas fuesen más sensible a la alteración. A esto hay que añadir que la zona quemada es además la zona externa del material, que por tanto es en general más propensa a los procesos de alteración que las zonas más interiores de la piedra.

La aparición del pico de 15 Å podría deberse a la presencia de clorita-montmorillonita a partir de alguna transformación o alteración de las micas. Sin embargo no existen datos suficientes para asegurar una causa más concreta.

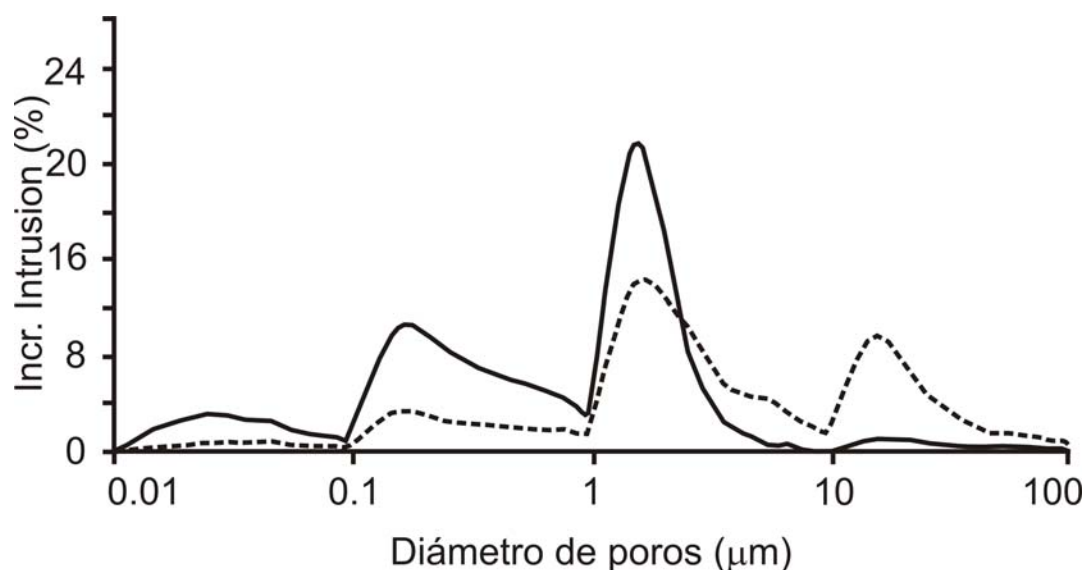


**Figura 11.43:** Curvas TG (azul) y DSC (rojo) de granito de Guadarrama inafectado (a) y afectado (b) por el fuego.

Los análisis termogravimétricos muestran pocas diferencias entre si, manteniéndose los picos principales correspondientes a las transformaciones desplazativas de cuarzo y feldespatos así como la fusión de los feldespatos. No existe apenas pérdida de peso en termogravimetría por lo que las oscilaciones observadas pueden corresponder a causas instrumentales.



**Figura 11.44:** Difractogramas de granito de Guadarrama quemado y sin quemar. Cuarzo (Q), Feldespato potásico (F), Plagioclasa (P), Biotita (B), Paragonita (Pr), Montmorillonita (M).



**Figura 11.45:** Distribución de la porosidad en el granito de Guadarrama inafectado (línea continua) y afectado (línea de trazos) por el fuego.

Con respecto a la porosidad de la muestra esta se duplica aproximadamente (Tabla 11.11), lo que concuerda con las observaciones realizadas con los distintos tipos de microscopía. La distribución de poros en la muestra sana (Figura 11.45) presenta cuatro picos con forma de campana de Gauss asimétrica. Estos picos se mantienen en la zona quemada, aunque varían sus proporciones relativas. En general se produce un descenso de la microporosidad ( $< 5 \mu\text{m}$ ) a favor de la macroporosidad. Los picos a menores tamaños ( $0,025 \mu\text{m}$ ,  $0,15 \mu\text{m}$  y  $1,5 \mu\text{m}$  aproximadamente) disminuyen su proporción tanto más cuanto menores son (67, 62 y 36 % respectivamente), mientras que el pico mayor ( $15 \mu\text{m}$ ) aumenta como reflejo de los procesos de fisuración producidos por el fuego.

**Tabla 11.11:** Datos de Porosimetría de Intrusión de Mercurio para muestras de granito de Guadarrama.

	Inafectada	Afectada
<b>Porosidad (%)</b>	1,59	3,54
<b>Densidad aparente (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	2,57	2,52
<b>Densidad real (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	2,61	2,61
<b>Área de poros (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>	0,15	0,12
<b>Mediana del tamaño de poros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,66	3,19
<b>Media del tamaño de poros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,16	0,46

Con respecto al ratio del hierro férrico/ferroso, este se multiplica casi por cuatro en la zona quemada. Este aumento es mayor que en ninguno de los casos anteriormente

estudiados debido a que, mientras que en las otras litologías existían cantidades mayores de partida de hierro férrico disperso, en este caso casi todo el contenido inicial de hierro correspondía a hierro ferroso contenido en minerales como la biotita.

**Tabla 11.12:** Datos de contenido en hierro ferroso y férrico en granito de Guadarrama.

	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
No afectada	0,94	0,07	0,07
Quemada	0,73	0,20	0,27

### **11.3. Influencia de la litología en el deterioro de los materiales pétreos a altas temperaturas.**

Como conclusión de este estudio se comprueba que se pueden diferenciar dos grandes grupos de materiales en lo referente a su comportamiento con respecto al fuego más allá de las diferencias en comportamiento macroscópico. Los estudios de los cambios texturales y mineralógicos realizados en estos materiales corresponden a casos en los que los fuegos se alimentaban con combustibles similares, lo que condiciona una uniformidad en las máximas temperaturas alcanzadas (en torno a unos 500 °C por los indicadores mineralógicos existentes). De aquí que los diferentes comportamientos observados dependen principalmente de la litología y no de las condiciones de incendio. Por un lado los materiales granulares, donde los cambios químico-mineralógicos presentan mayor importancia, y por otro lado los materiales tenaces en los cuales los efectos mecánicos de rotura son predominantes.

En todos los casos el principal daño producido por el fuego es el estético, que en este caso, debido a que lo que se estudia son materiales procedentes de edificios históricos y patrimoniales, tiene una importancia especial. Más allá de las consecuencias posteriores que pudiera tener para la conservación de la piedra, el cambio de color de un material que entra a formar parte de una obra de arte, en este caso un edificio, supone una variación de la percepción estética de la obra de arte y por tanto una distorsión de su concepción original. La oxidación de muy pequeñas cantidades de hierro puede producir

cambios de color muy notables debido a la extraordinaria capacidad cromófora del catión férrico.

También se aplica de manera general a todos los materiales los efectos que los residuos de la combustión (humos y cenizas) tienen en el material. Independientemente de su mayor o menor entrada en el sistema poroso, estos residuos producen un enmugrecimiento de las superficies, que se suma al cambio de color producido por la oxidación del hierro, e introducen una serie de elementos nuevos en el sistema de la roca, como por ejemplo carbono, azufre, nitrógeno, fósforo, etc. La combinación de estos elementos con los productos de alteración de la roca pueden dar lugar a sales como sulfatos, nitratos o fosfatos. Esto puede tener importantes consecuencias para el futuro deterioro de la piedra.

Con respecto a los materiales detríticos friables, los cambios principales se observan en la matriz, existiendo dos comportamientos diferenciados dependiendo de que la matriz sea de composición principalmente carbonatada o arcilloso-silíceo. Los minerales de la arcilla, tales como la palygorskita, la esmectita o la illita, presentan una evolución notable con la temperatura, produciéndose procesos de deshidratación y dehidroxilación que destruyen la estructura de estos minerales. Esto produce un cambio textural importante en la matriz y una modificación del sistema poroso. La modificación de la matriz puede debilitar la cohesión de la roca, lo que favorece procesos como la disgregación granular que se observa en la arenisca de Villamayor. La variación del sistema poroso introducirá modificaciones en los procesos de deterioro relacionados con el agua. La heterogeneidad generada entre la zona afectada por el fuego y el substrato puede favorecer el deterioro, por ejemplo actuando de plano de despegue para morfologías de deterioro planares como los desplazados que se observan en la arenisca de Uncastillo.

Los granos del esqueleto permanecen relativamente inertes debido a que la “competencia por el espacio” es menor debido a que la alta porosidad y la presencia de una matriz que actúa de forma elástica atenúa los efectos mecánicos que pudiera tener la dilatación entre los granos que forman el esqueleto

En los materiales tenaces, los cambios fundamentales que se producen son los debidos a la fisuración provocada por las diferencias en la dilatación térmica. Esto se ve favorecido por la ausencia de matriz, que en los materiales detríticos granulares actúa

como amortiguador de las dilataciones. También, cuanto menos poroso es un material, más sensible es a la acción del fuego debido a que el mayor empaquetamiento de los cristales aumenta los esfuerzos generados al dilatarse los cristales. Estos procesos son más intensos en rocas de composición heterogénea, pues la diferencia entre las dilataciones de los diferentes minerales magnifica los efectos de tensión producidos por la dilatación.

Los cambios mineralógicos son un buen indicador de la máxima temperatura alcanzada por la roca durante el fuego, así se ha podido determinar que existe una convergencia de temperaturas en los tipos de fuego estudiados que ronda los 500 °C. Esto concuerda con las referencias obtenidas en la bibliografía para fuegos alimentados por maderas de coníferas. Los materiales carbonáticos son en general menos sensibles a la acción del fuego, como se ve en la arenisca de Uncastillo y en la dolomía de Redueña. El principal cambio que se produce en estos materiales es la calcinación, y, dado que este proceso se produce en torno a los 800 °C, no se produce fácilmente por exceder este rango de temperaturas establecido como normal para un fuego.

El fuego produce modificaciones importantes en los materiales pétreos que van desde el cambio de color y la introducción de nuevos componentes en la roca, a la modificación del sistema poroso y la rotura mecánica. De tal manera el fuego produce dos tipos de deterioro: Por un lado el deterioro inmediato que causa el cambio de color y la fisuración, y por otro lado el deterioro que se puede producir a largo plazo debido a las modificaciones minerales y texturales.

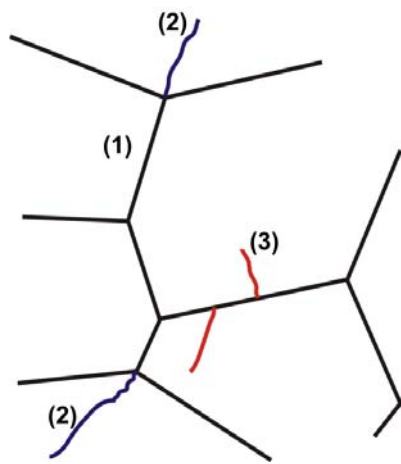
## **12. Relaciones entre el deterioro térmico a temperaturas ambientales y altas y los mecanismos de *choque térmico* y *fatiga*.**

Desde un punto de vista mecánico, se puede definir la *fatiga* como la rotura de un material debido a la acumulación de esfuerzos, mientras que el *choque* (shock) es la rotura generada en un único episodio por un sólo esfuerzo.

En la historia del estudio de los procesos de deterioro térmico, se ha llegado a menudo a efectuar una relación directa entre meteorización por insolación y fatiga, como opuesto a deterioro por fuego y choque térmico (Griggs, 1936; Ollier, 1969; Aires-Barros et al., 1975; Yatsu, 1988; Bernardi y Vincenzi, 1993; Warke y Smith, 1994; Halsey et al., 1998). En estos casos, se ha puesto el acento en la velocidad con la que se produce una morfología de deterioro macroscópica y no en la realidad del proceso mecánico que haya podido tener lugar. Los resultados obtenidos en esta tesis indican que esta simplificación es incorrecta y que no se debe considerar el estudio de la mecánica de fractura sólo en función de la escala de observación.

A lo largo de los anteriores capítulos se han mostrado diversos ejemplos de cómo la escala de observación puede modificar la percepción de un proceso de deterioro. Por ejemplo, al aumentar la densidad espacial de muestreo para obtener un perfil de temperaturas en una roca heterogénea, pierde validez el modelo en el cual los ciclos ambientales producirían la rotura del material de manera direccional (desplacado). El aumento de la frecuencia temporal de medidas de temperaturas ambientales en situaciones reales muestra la importancia de ciclos de corto rango que superan el límite inferior propuesto como necesario para el choque térmico.

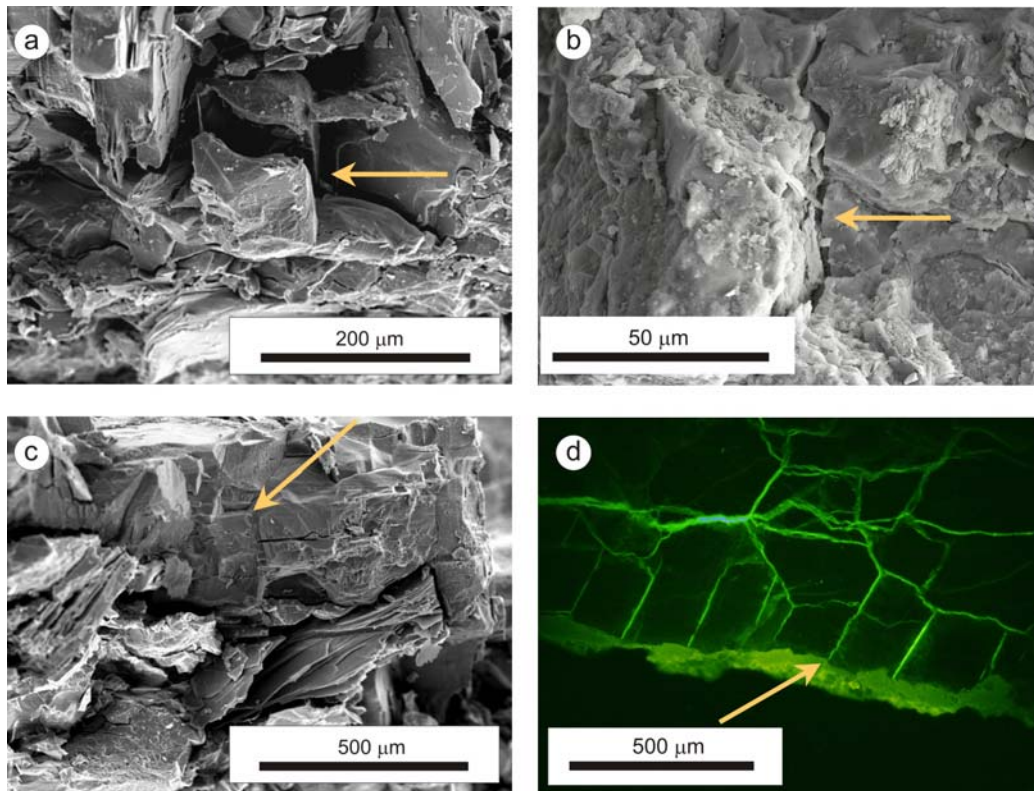
El hecho de que algunas formas de deterioro aparecen más rápidamente que otras, no es razón suficiente para asimilarlas a un mecanismo de deterioro determinado, ya que “Las formas de deterioro puede que no revelen los procesos que las produjeron” (Cooke y Warren, 1973). La figura 12.1 muestra un esquema que recoge los diferentes tipos de fisuras que se pueden generar en un material pétreo. Desde el punto de vista de la interpretación del deterioro de los materiales pétreos, se ha asumido a partir de la interpretación de diferentes teorías de fracturación (p.ej. Griffith, 1921), que estos tipos de fisuras se pueden relacionar con un mecanismo de fracturación.



**Figura 12.1:** Tipos de fracturas en materiales pétreos: Apertura de discontinuidades existentes (1), desarrollo de fisuras preexistentes (2) y generación de nuevas fisuras (3).

Así los fenómenos de fatiga térmica generarán fisuras intergranulares (1), mientras que los procesos de choque térmico favorecerán la propagación de fisuras preexistentes (2) y pueden llegar a provocar la generación de nuevas fracturas no relacionadas con la propagación de ninguna discontinuidad anterior (3).

Partiendo de estas relaciones, los resultados obtenidos en esta investigación muestran que tanto en los procesos de deterioro por variaciones de temperatura ambiental (usualmente adscritos a fenómenos de fatiga), como en los procesos de deterioro a partir de altas temperaturas (generalmente relacionados con el choque térmico), aparecen indistintamente fisuras inter, intra y transgranulares.



**Figura 12.2:** Fisuración intragranular en fenómenos de deterioro térmico a temperaturas ambientales (a,c) y fisuración intergranular asociada a deterioro térmico a altas temperaturas (b, d)



La figura 12.2 muestra unos ejemplos de fisuración térmica que serían incongruentes si consideramos como absolutos los binomios insolación-fatiga y fuego-choque térmico. En las figuras 12.2a y c se observa como granos minerales están fragmentados a favor de fracturas intragranulares, que, según lo anteriormente descrito, corresponderían a un choque térmico. Por otro lado, las figuras 12.2b y d muestran zonas externas de materiales pétreos quemados en un incendio en las cuales sólo se observa fisuración intergranular.

Con respecto al fenómeno de la insolación, en un material no dúctil, para que una fractura, inicialmente corta e inestable a una diferencia de temperatura crítica, se propague por choque térmico, necesita de un incremento finito de temperatura para continuar su progresión hasta una nueva longitud. (Hasselman, 1971). En el capítulo 9, se observaba que los materiales pétreos sometidos a insolación sufren gradientes de temperatura superiores a  $2^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ , que es el límite que se ha establecido para que se produzcan fenómenos de choque térmico (Yatsu, 1988) y por tanto la propagación de y nucleación de nuevas fracturas.

Sin embargo, puede ocurrir que estos fenómenos de choque térmico sean de pequeña magnitud y se circunscriban a escalas cristalinas o granulares y, por tanto, no se expresen en una forma macroscópica de deterioro que comprometa la estabilidad mecánica de la roca en su conjunto. Así, la consideración de fatiga y choque térmico puede depender de la escala de observación. Si estudiamos la evolución de un sillar de piedra a nivel de granos minerales, estos pueden sufrir una rotura generada en un único episodio por un sólo esfuerzo (y por tanto un choque térmico) sin connotaciones macroscópicas. A nivel de un sillar, estos choques térmicos individuales pueden generar la rotura del sillar debido a la acumulación de los mismos (lo que según su definición sería fatiga térmica).

En el caso del deterioro por fuego, no se puede negar la preeminencia de los fenómenos de choque térmico. Sin embargo, estos pueden estar muy influenciados por la historia previa de esfuerzos del material. Así, por ejemplo, comparando los ensayos de laboratorio realizados en el capítulo 10 sobre muestras de cantera de areniscas de Villamayor y Uncastillo con los casos de materiales de edificios quemados en fuegos reales, se observa que existe una diferencia entre los resultados. El material situado en los edificios ha sufrido una serie de agentes de deterioro previos que, aunque puede que

no le hayan afectado visiblemente, han dejado una serie de esfuerzos heredados que pueden condicionar el efecto que el fuego produzca sobre el material.

Así, como se discutía en el capítulo 10, un fuego de una temperatura determinada puede no generar formas de deterioro mecánico sobre un material de cantera, mientras que puede producir la rotura completa del mismo material que haya sufrida una serie de agentes de deterioro previos en un edificio.

El choque y la fatiga térmica son dos mecanismos que, lejos de establecer una dicotomía, no aparecen aislados. La consideración sobre si el resultado determinado de un proceso de deterioro térmico ha sido causado por efectos de fatiga o choque se establece como una cuestión de escala de observación. En general, cuanto más detallada es la escala de observación, tanto en el tiempo como en el espacio, aumenta la importancia relativa del fenómeno de choque térmico. Cualquier proceso que conduzca a una rotura del material, por imperceptible que esta sea, va a conllevar el choque que supone la existencia de una nueva fractura donde antes no la había.

Los procesos de deterioro no deben discutirse sólo sobre la base de las formas de deterioro generadas, ya que en la mayoría de los casos no existe una correspondencia unívoca entre agente, proceso y forma de deterioro por lo que las formas de deterioro no tienen por que revelar por si mismas el proceso a partir del cual se han formado. Esto es especialmente notable, como es en este caso, en formas de deterioro tales como las de rotura mecánica, debido a la amplitud de procesos que pueden generarla.

Lo que se llama *fatiga térmica* puede ser, de hecho, la suma de pequeños episodios de *choque térmico* y análogamente, un proceso instantáneo de *choque térmico*, puede ser solo el resultado de una historia previa de esfuerzos dominada por mecanismos de fatiga. De tal forma, es conveniente tener en cuenta que la escala de observación influye en la consideración de los mecanismos de rotura y no se deben hacer equivalencias absolutas meteorización por insolación – fatiga y deterioro por fuego – choque térmico.

### **13. Conclusiones**

El deterioro térmico es una realidad presente en los materiales pétreos, aunque a una escala mucho más limitada de lo que muchos estudios anteriores han pretendido. En regímenes de temperatura en el rango ambiental en latitudes medias, la meteorización por insolación es un proceso físico de pequeña escala que aparece circunscrito a situaciones litológicas, estructurales y ambientales muy específicas (heterogeneidades litológicas fundamentalmente). Suponiendo la idealización de considerarlo un agente de deterioro actuando aislado con respecto a otros agentes frecuentes de deterioro (sales, contaminación, etc), su efectividad tiene un alcance muy limitado en relación con ellos, no produciendo daños estructurales o visuales de gran magnitud. En este sentido, la *meteorización por insolación* de sillares de piedra se puede considerar un proceso, existente pero de escasa importancia en el conjunto del deterioro de los materiales pétreos.

Sin embargo, considerando el deterioro de la piedra como el resultado de un conjunto de agentes actuando de manera sinérgica, se prueba su influencia sobre otros procesos de deterioro, como por ejemplo la cristalización de sales o el hielo-deshielo. Es en este punto donde los efectos del calentamiento por radiación alcanzan una mayor relevancia para el conjunto del deterioro sufrido por un edificio o monumento. Estos efectos se deben de tomar en consideración a la hora de diseñar experimentos de deterioro acelerado de los materiales, cualesquiera sea el agente “principal” que estemos ensayando.

Las implicaciones prácticas en el sentido de la prevención del deterioro del patrimonio son limitadas. Salvo en el caso de heterogeneidades litológicas generadas antrópicamente durante el diseño del edificio o la inclusión de elementos estructurales o de mobiliario urbano que generen sombras en las fachadas, o planos inclinados donde se recibe mayor insolación, las posibilidades de prevenir los efectos del sobrecalentamiento producido por la radiación solar son pocas o nulas.

Por el contrario, el deterioro térmico producido a altas temperaturas por el fuego es uno de los procesos evitables más destructivo para los materiales pétreos. El fuego produce el deterioro físico y químico de la piedra; siendo la importancia relativa de los

procesos físicos o químicos dependiente de la litología quemada. El fuego deteriora la piedra tanto a corto como a largo plazo. A corto plazo puede generar un deterioro estructural y visual importante. A largo plazo, los cambios composicionales y texturales pueden acelerar la acción de otros agentes de deterioro. Además, los residuos generados en la combustión que se introducen en el material pueden generar sales que afectarán a la posterior durabilidad del material.

En el ensayo de los materiales pétreos con respecto al fuego, se debe incidir en la utilización de métodos que empleen muestras de los edificios o monumentos estudiados, para tener en cuenta la historia previa de deterioro del material, y que empleen sistemas de calentamiento por radiación con poco consumo de muestra, como por ejemplo el láser, para adecuar el ensayo en el laboratorio a la dinámica real de este agente y minimizar la utilización de muestras de los edificios o monumentos.

De manera más específica, estas conclusiones generales se pueden individualizar en los siguientes puntos:

**La respuesta de los materiales pétreos al calentamiento en regímenes de convección y radiación es muy diferente.** El calentamiento por radiación genera una anisotropía térmica mayor en el seno de los materiales, dando lugar a gradientes de temperatura intensos con connotaciones dinámicas muy importantes. Esto encuentra su expresión en los medios naturales en diferentes tasas de deterioro para materiales pétreos situados en zonas sin insolación (donde los materiales se calientan por convección) y zonas permanentemente o parcialmente insoladas (donde existe calentamiento por radiación).

**El albedo y la conductividad térmica son las propiedades de los materiales pétreos que más condicionan, en términos generales, su respuesta térmica frente a la radiación.** El albedo es la propiedad que condiciona en mayor medida la temperatura superficial de los materiales (a menor albedo, mayor temperatura superficial) mientras que la conductividad térmica influye principalmente en la intensidad de los gradientes de temperatura que se alcanzan en el interior del material (a menor conductividad térmica, gradientes más intensos). Estas propiedades no solo son función de la

composición mineral, sino también de la textura: cuanto mayor es la porosidad de un material, menor es su conductividad térmica.

En las rocas monominerales, las isotermas se distribuyen paralelamente a las superficies, por lo que **los materiales más susceptibles de generar formas de deterioro planas (desplacados) debidas a la insolación serían las rocas calcáreas de bajo albedo y muy porosas**, donde concurren los menores valores de conductividad térmica, mayor absorción de calor y homogeneidad. Sin embargo, debido a la porosidad, la probabilidad de que se produzcan fenómenos de termoclastia frente a la de que se produzca deterioro relacionado con la humedad es muy pequeña.

La temperatura en la superficie de los materiales pétreos poliminerales no es homogénea y **existen diferencias de temperatura notables entre los granos minerales de la superficie**. Además de las diferencias de albedo, conductividad térmica y capacidad calorífica; el tamaño, que condiciona la cantidad de masa que se ha de equilibrar térmicamente con su entorno, influye en estas diferencias térmicas a pequeña escala.

En las rocas poliminerales las isotermas quedarían definidas por curvas subparalelas a la cara calentada, lo que reduce la importancia relativa de los esfuerzos de cizalla y tensión paralelos a la superficie para aumentar la importancia de un campo tridimensional de esfuerzos en la zona más externa de la roca. Así, **en rocas heterogéneas y poco porosas, como las rocas ígneas granudas, la termoclastia se expresará con más probabilidad como formas de deterioro no direccional (disgregación granular)**.

Sin embargo, debido a que la superficie del material presenta menor carga confinante, los procesos de disgregación en superficie son mucho más probables. Así, en cualquiera de los casos, **la probabilidad general de que la meteorización por insolación, como ente individual, se exprese en disgregación granular o microdesplacados de escala granular es mayor que la de que se manifieste en la aparición de un desplazado de mayor entidad**.

En el interior de la muestra, la respuesta al calentamiento presenta un retardo frente al superficial. Las fluctuaciones de temperatura de mayor rango penetran más profundamente en la roca pero tienen velocidades de cambio menores, lo que permite a la roca a alcanzar estadios progresivos de equilibrio. Por otro lado, cuanto más cortas

son las fluctuaciones térmicas, menor es la profundidad de penetración de las ondas térmicas en el material pero más intensos los gradientes de temperatura. Así, **los ciclos de variación de temperatura de corto rango son más efectivos en la meteorización por insolación**; no siéndolo, por el contrario, el calentamiento prolongado de los materiales.

El hecho de que las diferencias de temperatura más importantes y los gradientes más intensos se encuentran al inicio de las rampas de calentamiento y enfriamiento de los ciclos sugiere que los climas donde susceptiblemente se producirían procesos de termoclastia no tienen que ser necesariamente extremadamente cálidos o fríos como hasta ahora se ha propuesto. De hecho un clima de latitudes medias provee numerosos periodos de rápido aumento y/o descenso de la temperatura. De este modo, **la meteorización por insolación no debe considerarse sólo desde el punto de vista de las temperaturas alcanzadas, sino también del número de variaciones de corto rango causadas por viento o nubes**. Un clima extremo no ha de favorecer necesariamente una respuesta extrema de los materiales. Así por ejemplo en verano, aun cuando las temperaturas ambientales sean mayores, la respuesta térmica en una fachada con orientación sur, con un tiempo de insolación muy largo, es relativamente moderada debido al bajo ángulo de incidencia de los rayos solares.

La existencia de elementos que proyecten sombras discontinuas sobre los edificios multiplica el número de ciclos de calentamiento y enfriamiento que sufren las fachadas de los edificios. Así, **los elementos estructurales del edificio, así como elementos circundantes tales como árboles, edificaciones, etc. que proyecten sombras discontinuas sobre fachadas favorecen la generación de formas de deterioro relacionadas con la insolación**.

**El muestreo de temperaturas en los estudios sobre meteorización por insolación se debe realizar de manera muy detallada, tanto en términos de espacio como de tiempo**, debido a que los principales mecanismos a través de los cuales actúa la insolación se encuentran a pequeña escala espacial y temporal. También es aconsejable el uso de métodos de medida de temperatura sin contacto, como la termometría de infrarrojos, para eliminar el *efecto sensor* (o perturbación generada por el propio comportamiento térmico del sensor)

El fenómeno de meteorización por insolación es, en latitudes medias, escaso pero presente, y en todo caso, muy lento. **La probabilidad de que existan fenómenos de termoclastia se aumenta cuando existen variaciones en las propiedades de superficie en materiales adyacentes u heterogeneidades en el mismo material** (especialmente relacionadas con variaciones de albedo).

Los tratamientos de protección (consolidantes e hidrofugantes) pueden modificar las características superficiales de la piedra y variar su respuesta térmica. Así mismo, **los fenómenos térmicos relacionados con la insolación aceleran el envejecimiento de los tratamientos de protección de la piedra.**

El régimen de calentamiento influye notablemente en la dinámica de cristalización de las sales en los materiales porosos. **En el caso del cloruro sódico el calentamiento por radiación favorece la formación de subeflorescencias en la piedra**, lo que es más destructivo que la aparición de eflorescencias.

La temperatura de un material pétreo expuesto en un entorno natural de radiación no corresponde a la temperatura del ambiente. Así, se observa que aun con heladas nocturnas y temperaturas ambientes bajo cero, la temperatura de la piedra, en determinadas situaciones, no alcanza temperaturas bajo cero, por lo que el agua contenida en los poros no se helaría y no se producirían fenómenos de hielo-deshielo. Por tanto, **a la hora de plantear la necesidad de un eventual ensayo de envejecimiento acelerado por hielo-deshielo se debe de partir de evidencias de temperatura de la piedra y no de regímenes de temperatura ambiental.**

Debido a las diferencias que existen entre el calentamiento por radiación y por convección y la influencia que tiene el calentamiento por radiación en la distribución de temperaturas en el seno de un material pétreo y en la dinámica de otros agentes de deterioro como por ejemplo las sales o el hielo-deshielo, **se recomienda que cualquier tipo de ensayo de laboratorio sobre procesos de deterioro o ensayo de envejecimiento acelerado, se realice en cámaras ambientales donde el calentamiento de la muestra se haga mediante radiación.**

Con respecto al fuego, este produce cambios físicos y químicos en los materiales pétreos, dependiendo de la litología quemada. **El daño más visible producido por el**

**fuego en los materiales con hierro es el estético, debido al cambio de coloración producido por la oxidación térmica del hierro en el intervalo 250-300 °C.** La oxidación de muy pequeñas cantidades de hierro puede producir cambios de color muy notables debido a la extraordinaria capacidad cromófora del catión férrico.

Existe una convergencia de temperaturas en fuegos de diversos tipos en edificios históricos en diversos puntos de España, en que el combustible principal es la madera de coníferas. De esta manera, siempre que el edificio no incluya materiales modernos incluidos en rehabilitaciones **se puede definir que la temperatura normal de un incendio en un edificio histórico es de aproximadamente 500 °C.**

En lo referente al comportamiento de los materiales pétreos con respecto al fuego se pueden dividir dos grandes grupos según los efectos que produce el fuego: materiales granulares y materiales tenaces. **Los materiales granulares (areniscas) no sufren daños mecánicos macroscópicos importantes ante un fuego, siendo los principales efectos de carácter químico y relacionados con la composición de la matriz.** En las areniscas calcáreas los principales cambios se relacionan con la calcinación de la calcita a partir de 800 °C. En las areniscas de matriz silicatada se producen cambios estructurales en los minerales de la arcilla a partir de 250 °C.

**En los materiales tenaces, los principales cambios son físicos, y se deben fundamentales a la fisuración provocada por las diferencias en la dilatación térmica.** Esto se ve favorecido por la ausencia de matriz, que en los materiales detríticos granulares actúa como amortiguador de las dilataciones. También, cuanto menos poroso es un material, más sensible es a la acción del fuego debido a que el mayor empaquetamiento de los cristales aumenta los esfuerzos generados al dilatarse los cristales. Estos procesos son más intensos en rocas de composición heterogénea, pues la diferencia entre las dilataciones de los diferentes minerales magnifica los efectos de tensión producidos por la dilatación.

Tanto en materiales granulares como en materiales tenaces, **las litologías calcáreas son más resistentes al fuego que las silicatadas;** debido a que en las primeras los cambios mineralógicos se producen a temperaturas inusualmente altas en incendios en edificios patrimoniales

**En todas las litologías los residuos de la combustión producen efectos que se pueden extender a largo plazo.** Estos residuos producen un enmugrecimiento de las



superficies, que se suma al cambio de color producido por la oxidación del hierro, e introducen una serie de elementos nuevos en el sistema de la roca, como por ejemplo carbono, azufre, nitrógeno, fósforo, etc. La combinación de estos elementos con los productos de alteración de la roca pueden dar lugar a sales como sulfatos, nitratos o fosfatos, lo que puede tener importantes consecuencias para el futuro deterioro de la piedra.

**La técnicas láser son muy adecuadas para la modelización de condiciones de incendios en materiales pétreos de construcción.** El láser presenta como ventajas la poca cantidad de muestra que se necesita para realizar los ensayos (lo que permite utilizar muestras provenientes de edificios monumentales), su fidelidad de reproducción de la física del proceso real de quemado (por radiación), facilitar la toma de datos durante los experimentos y un control muy exhaustivo de los parámetros experimentales, lo que garantiza una alta repetibilidad de los ensayos.

**Las equivalencias, meteorización por insolación – fatiga térmica y deterioro por fuego – choque térmico, no deben considerarse como absolutas** y las futuras investigaciones no deberían considerar solo el tiempo de aparición de una forma de deterioro macroscópica para inferir un determinado proceso mecánico de rotura.

El deterioro térmico de los materiales pétreos de construcción es una realidad compleja y esta tesis sólo abre el horizonte a futuras investigaciones al respecto. Las líneas de investigación a desarrollar en el futuro deben incluir aspectos tanto tecnológicos como científicos. Estas serían algunas de las actuaciones más inmediatas para continuar el trabajo emprendido en esta tesis:

Para proseguir los estudios sobre los efectos dinámicos de la meteorización por insolación se deben buscar alternativas a los métodos tradicionales de ensayo. Dado que la modelización “real” en el laboratorio del efecto que la insolación es difícil, por la cantidad de tiempo que un ensayo de insolación necesita, se debe avanzar en la generación de modelos numéricos del tipo Modelización de Elementos Finitos (FEM). De esta manera a partir de las propiedades térmicas de los diferentes componentes de un material pétreo se puede generar un ensayo “virtual” de meteorización por insolación.

En lo que se refiere a la influencia de la insolación y de la distribución anisótropa de temperaturas en el seno de los materiales en otros agentes de deterioro, es necesario que se desarrollen nuevas técnicas que combinen la modelización de diversos agentes de deterioro con la acción del calentamiento por radiación de los materiales pétreos a temperaturas ambientales. El relativo bajo coste que supone sustituir los sistemas de calentamiento tradicionales por convección por cámaras climáticas que incluyan el calor por radiación, facilitaría que a nivel industrial se produjera un progresivo abandono de los métodos tradicionales de ensayo de los materiales pétreos y que en un plazo adecuado se desarrollase normativas de ensayo de la piedra natural que tuviesen en cuenta este factor.

Con respecto al deterioro producido por el fuego, uno de los aspectos más interesantes a desarrollar es la influencia que en el daño generado por un fuego tiene la historia previa de deterioro que un material pétreo haya sufrido. La comparación entre los ensayos de muestras de cantera y de muestras de edificios puede responder a la pregunta de en qué medida un ambiente, por ejemplo, contaminado puede tener en la generación de un mayor o menor deterioro a causa del fuego. Para ello, tras los resultados satisfactorios obtenidos en esta tesis, se han de implementar las técnicas como el láser.

La búsqueda de soluciones técnicas específicas para la conservación y rehabilitación de materiales pétreos afectados por incendios es otro punto importante a desarrollar. El fuego produce importantes cambios físicos y químicos en muchos materiales; sin embargo, no existen investigaciones concretas sobre que técnicas de conservación o rehabilitación son más adecuadas en los casos de edificios quemados.

## **Referencias.**

- Aires-Barros, L., 1977. Experiments on thermal fatigue of non-igneous rocks. *Engineering Geology*, 11: 227-238.
- Aires-Barros, L., Graça, R.C. y Velez, A., 1975. Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. *Engineering Geology*, 9: 249-265.
- Aires-Barros L., Neto M.J. y Soares C., 1998. The monastery of Batalha (Portugal): Restoration works and Historic quarries, a preliminary study. In: IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. CICOP, Tenerife, pp. 384-386.
- Alcalde Moreno, M. y Villegas Sánchez, R., 2003. Indicadores de alteración de los materiales pétreos. In: R. Villegas Sánchez y E.M. Sebastián Pardo (Editores), *Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos*. Comares, Granada, pp.58-71
- Allison, R.J. y Goudie, A.S., 1994. The effects of fire on rock weathering: An experimental study. In: D.A. Robinson y R.B.G. Williams (Editores), *Rock Weathering and Landform Evolution*. Wiley, Chichester, pp. 41-56.
- Alvarez, A., Estrada, R., Gueddari, F., Figuiredo, M.O., Veiga, J.P. y Vilaseca, L., 2002. Characterisation of materials used in the aqueduct of Zaghouan – Carthage (Tunisia) along construction and restoration periods. In: Galán, E., Zezza, F. (Editores), *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 101-106
- Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Varas, M.J. y Gómez-Heras, M., 2004. Panteón de Hombres Ilustres, Madrid, Spain: Building materials, degradation and conservation. In: L. Aires-Barros, F. Zezza, A. Dionisio y M. Rodrigues (Editores), *Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage. Lectures and Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisboa, pp. 123-127.

- American Society for Testing and Materials, 2000. E313-00 Standard Practice for Calculating Yellowness and Whiteness Indices from Instrumentally measure Color Coordinates. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Amoroso, G.G. y Fassina, V., 1983. Stone decay and conservation : atmospheric pollution, cleaning, consolidation, and protection. Materials science monographs 11. Elsevier, Amsterdam, xix, 453 pp.
- Arrese, F., Lozano, A., Martín-Patino, T. y Rodríguez, B. 1964. Estudio de las Areniscas de Villamayor (Salamanca). Estudios Geológicos 20, 87-105
- Ashurst, J. y Dimes, F.G., 2004. Conservation of Building and Decorative Stone. Elsevier, Amsterdam, 254 pp.
- Asmus, J.F., Murphy, C.G. y Munk, W.H., 1973a. Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts. In: Proc. SPIE Vol. 41 'Developments in Laser Technology II', SPIE, The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA. pp. 19-30
- Asmus, J.F. Guattari, G., Lazzarini, L., Musumeci, G. y Wuerker, R.F., 1973b. Holography in the conservation of statuary. Studies in Conservation, 18: 49-63.
- Barroso, M. G., 1944. Areniscas eocenas de los alrededores de Salamanca empleadas como piedra de edificación. Boletín R. Soc. Esp. Historia Natural XLIV, 615-620.
- Barton, D.C., 1916. Notes on the disintegration of granite in Egypt. Journal of Geology, 24: 382-393
- Bell, F.G., 1993. Durability of Carbonate rock as building stone with comments on its preservation. Environmental Geology, 21: 187-200.
- Benavente, D., 2002. Modelización y Estimación de la Durabilidad de Materiales Pétreos Porosos frente a la Cristalización de Sales (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante, Alicante, 289 pp.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordoñez, S., 1999. Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. Journal of Crystal Growth, 204(1-2): 168-178.

- Benavente, D., García del Cura, M.A., Bernabéu, A. y Ordoñez, S., 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59: 313-325.
- Bernardi, A. y Vincenzi, S., 1993. Modelling daily thermal cycles in the Trajan Column. *The Science of the Total Environment*, 128: 257-267.
- Berriochoa, V., 2002. Comunicación personal. Visita técnica del curso de doctorado: La Catedral, Forma y Función. Real Academia de Bellas Artes de España.
- Blackwelder, E., 1926. Fire as an agent in rock weathering. *Journal of Geology*, 35: 134-410.
- Blackwelder, E., 1933. The insolation hypothesis of rock weathering. *American Journal of Science*, 5th Series, 26(152): 97-113.
- Boydton, R.S., 1980. *The Chemistry and Technology of Lime and Limestone* (2<sup>a</sup> ed). Wiley & Sons. New York.
- Branner, J.C., 1896. Decomposition of rocks in Brazil. *Bulletin of the Geological Society of America*, 7: 255-314.
- Bromehead, C.E.N., 1945. Geology in Embryo (up to 1600 AD). *Proceedings of the Geological Association.*, 56 (2).
- Buckley, E.R., 1898. On the building and ornamental stones of Wisconsin. *Wisconsin Geological and Natural History Bulletin*, IV.
- Camuffo, D., 1998. Microclimate for cultural heritage. *Developments in atmospheric science* ; 23. Elsevier, Amsterdam; New York, xiv, 415 pp.
- Camuffo, D., Vincenzi, S., Pilan, L., 1984. A first-order analysis of the heat wave in the soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 23: 441-454.
- Cermák, V. y Rybach, L., 1982. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: G. Angenheister (Editor), *Physical Properties of the Rocks*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 305-343.
- Chakrabarti, B., Yates, T. y Lewry, A., 1996. Effect of fire damage on natural stonework in buildings. *Construction and Building Materials*, 10(7): 539-544.

- Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), 1986. Colorimetry, 2nd edition. Publication CIE 15.2. Bureau central de la CIE, Paris, France, 83 pp.
- Commissione NORMAL, 1988. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico. Doc 1/88. CNR/Istituto Centrale per il Restauro, Roma.
- Cooke, R.U., 1981. Salt weathering in deserts. Proceedings of the Geologists Association of London, vol. 92. pp. 1 –16.
- Cooke, R.U., 1994. Salt weathering and the urban water table in deserts. In: D.A. Robinson and R.B.G. Williams (Editores), Rock Weathering and Landform Evolution. Wiley, Chichester, pp. 193-205.
- Cooke, R.U. y Smalley, I.J., 1968. Salt weathering in deserts. Nature, 220: 1226-1227.
- Cooke, R.U. y Warren, A., 1973. Geomorphology in deserts. Batsford, London, iii-xii, 394, [30] pp.
- Cooper, M.I., 1998. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction, Butterworth-Heinemann, Oxford, 98 pp.
- Correns, C.W., 1949. Growth and dissolution of crystals under linear pressure. Disc. Faraday Society, 5: 267-271.
- COST C17, 2001. Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST C17 "BUILT HERITAGE: FIRE LOSS TO HISTORIC BUILDINGS", 17 pp.
- Costela, A., García-Moreno, I., Gómez, C., Caballero, O. y Sastre, R., 2003. Cleaning graffiti on urban buildings by use of second and third harmonic wavelength of a Nd:YAG laser: a comparative study. Applied Surface Science, 207: 86-99.
- Correns, C.W., 1949. Growth and dissolution of crystals under linear pressure. Disc. Faraday Soc., 5: 267-271.
- Cubas, F. Marques de, 1886. Boletín eclesiástico del obispado de Madrid-Alcalá. T. I. n 39. pp. 688-696
- Cultrone, G., Barone, G., Gangemi, G. y Ioppolo, S., 2001. Lapidous materials from the columns of the cathedral of S. Maria di Randazzo (Catania) and from their origin quarries. Journal of Cultural Heritage, 2: 199-207.

- De Thury, H., 1828. Sur le Procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par les noms de pierres gelives ou pierres gelisses. *Annales de Chimie et de Physique*, 38: 160-192.
- Dorn, R.I., 2003. Boulder weathering and erosion associated with a wildfire, Sierra Ancha Mountains, Arizona. *Geomorphology*, 55(1-4): 155-171.
- Echevarría Caballero, M.R. y García Bielsa, J.I., 1996. El sector de la piedra natural. In: C. López Jimeno (Editor), *Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación*. Entorno Gráfico, Madrid, pp. 25-40.
- Ehling, A. y Kohler, W., 2000. Fire damaged Natural Building Stones, *Proceedings of 6th International Congress on Applied Mineralogy ICAM, Göttingen*, pp. 975-978.
- Esbert, R. M. y Alonso, J., 1995. Waterproofing of porous carbonate rocks: efficiency-controlling its properties. *Materiales de Construcción*, 45, 237, 15-30 (1995)
- Esbert, R.M. et al., 1997. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Col·legi d'aparelladors i arquitectes tècnics de Barcelona, Barcelona, 139 pp.
- Fitzner, B. y Heinrichs, K., 2002. Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. In: R. Prikryl and H.A. Viles (Editores), *Understanding and Managing Stone Decay, Proceedings of the International Conference "Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network (SWAPNET)*. Karolinum Press, Prague, pp. 11-56.
- Fitzner, B. y Heinrichs, K., 2004: Photo atlas of weathering forms on stone monuments. <http://www.stone.rwth-aachen.de>.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. y Kownatzki, R., 1995. Weathering forms – classification and mapping. *Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung*, 1; 41-88.
- Flatt, R.J., 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 242: 435-454.
- Folk, R.L., 1959. Practical petrographic classification of limestone. *AAPG Bulletin*, 43: 1-38.

- Fort González, R., 1996. Análisis del sistema poroso de las rocas. In: F. Mingarro Martín (Editor), *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Editorial Complutense, Madrid, pp. 321-332.
- Fort, R., Mingarro, F. y López de Azcona, M.C., 1996. Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid. *Geogaceta*, 20, 1236-1239.
- Fort, R., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F., 1998. Sustitución de elementos arquitectónicos en el Claustro de la Catedral de Cuenca (España): Selección de materiales pétreos. In: *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. CICOP, Tenerife, pp. 177-179.
- Fort, R., Bernabeu, A., García del Cura, M.A., López de Azcona, M.C., Ordoñez, S. y Mingarro, F., 2002. Novelda Stone: widely used within the Spanish architectural heritage. *Materiales de Construcción*, 52(266): 19-32.
- Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Mingarro, F. y López de Azcona, M.C., 2003. Chemical processes of alteration on the surface of building stones by antropogenic contamination. *Afinidad*, 60(507): 450-457.
- Fort González, R., Alvarez de Buergo, M., Mingarro Martín, F. y López de Azcona, M.C., 2004. Stone decay in 18th century monuments due to iron corrosion. The Royal Palace, Madrid (Spain). *Building and Environment*, 39(3): 357-364.
- Franzini, M., Gratzu, C. y Spampinato, M., 1984. Degradazione del marmo per effetto di variazioni di temperatura. *Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 39(1): 47-58.
- Fredrich, J.T. y Wong, T.-F., 1986. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12): 12743-12764.
- Galán, E., Guerrero, M.A., Vázquez, M.A. y Zezza, F., 1992. Progressive deterioration of marble columns by thermal changes in relation to their state of superficial decay. In: F.H. Delgado Rodrigues and F. Telmo Jeremias (Editores), *Proceedings of 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, pp. 905-913.
- Geiger, R., 1966. *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.



- Gobernador-Mitre, I. et al., 1996. Laser cleaning in art restoration. *Applied Surface Science*, 96–98: 474-478.
- Gómez-Heras, M. y Fort González, R., 2002. Cámara automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación. CSIC, Patente española, nº sol. 200201376, pp. 19.
- Gómez-Heras, M. y Fort González, R., 2003. Supplying of masonry materials in the construction of the Crypt of Santa María la Real de la Almudena, Madrid, Spain, 1883-1911. In: S. Huerta (Editor), 1st International Congress on Construction History. Instituto Juan de Herrera-ETSAM, Madrid, pp. 1051-1061.
- Gómez-Heras, M., Alvarez de Buergo, M., Rebollar, E., Oujja, M., Castillejo, M. y Fort, R., 2003. Laser removal of water repellent treatments on limestone. *Applied Surface Science*, 219(3-4): 290-299.
- Gómez-Heras, M. y Fort González, R., 2004. Location of quarries of non-traditional stony materials in the architecture of Madrid: The Crypt of the Cathedral of Santa María la Real de la Almudena. *Materiales de Construcción*, 54(274): 31-47.
- Gómez-Heras, M., Benavente, D., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R., 2004a. Soluble salt minerals from pigeon droppings as potential contributors to the decay of stone based Cultural Heritage. *European Journal of Mineralogy*, 16: 505-509.
- Gómez-Heras, M., Fort González, R. y Smith, B.J., 2004b. Problemas de escala en la interpretación del deterioro térmico por insolación de piedra de construcción. *Geotemas*, 6(1): 263-266.
- Gómez-Heras, M., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R., 2004c. Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires. In: D. Kwiatkowski and R. Löfvendahl (Editores), 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Stockholm 2004, pp. 561-568.
- Goudie, A.S., 1974. Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Zeitschr. Geomorphologie N. F. Suppl. Bd.*, 21: 1-12.
- Goudie, A.S., Allison, R.J. y McLaren, S.J., 1992. The relations between modulus of elasticity and temperature in the context of the experimental simulation of rock weathering by fire. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 605-615.

- Goudie, A.S. y Viles, H.A., 1997. Salt weathering hazard. Wiley, Chichester ; New York, vii, 241 pp.
- Goudie, A.S. y Viles, H.A., 2000. The thermal degradation of marble. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, 35: 7-16.
- Griffith, A.A., 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions Royal Society of London*, 221(A): 163-198.
- Griggs, D.T., 1936. The factor of fatigue in rock exfoliation. *Journal of Geology*, 44: 783-796.
- Grossi, C.M. y Esbert, R.M., 1994. Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales; revisión bibliográfica. *Materiales de Construcción*, 44: 15-30.
- Gu, B. X., Wang, L. M., Minc, L. D. y Ewing, R. C. 2001. Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites. *Journal of Nuclear Materials*, 297: 345-354.
- Hajpál, M., 2002. Changes in Sandstones of Historical Monuments Exposed to Fire or High Temperature. *Fire Technology*, 38(4): 373-382.
- Hajpál, M., 2004. Effect of Fire Damage of Sandstones in Laboratory Conditions. In: L. Aires-Barros, F. Zezza, A. Dionisio y M. Rodrigues (Editores), *Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage. Lectures and Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisboa, pp. 267-272.
- Hajpál, M. y Török, A., 2004. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology*, 46: 311-322.
- Hall, K., 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, 31(1-4): 47-63.
- Hall, K. y André, M.-F., 2001. New insights into rock weathering from high-frequency rock temperature data: an Antarctic study of weathering by thermal stress. *Geomorphology*, 41(1): 23-35.
- Hall, K. y André, M.-F., 2003. Rock thermal data at the grain scale: applicability to granular disintegration in cold environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 823-836.

- Hall, K. y Hall, A., 1991. Thermal Gradients and rock weathering at low temperatures: some simulation data. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2: 103-112.
- Halsey, D.P., Mitchell, D.J. y Dews, S.J., 1998. Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 31: 359-367.
- Hasselman, D. P. H ., 1971. Crack propagation under constant deformation and thermal stress fracture. *International Journal of Fracture Mechanics*, 7: 157.
- Hayashi, H., Otsuka, R. e Imai, N., 1969. Infrared study of sepiolite and palygorskite on heating. *American Mineralogist* 53, 1613-1624.
- Herrera Herbert, J., 1996. El sector de la piedra natural. In: C. López Jimeno (Editor), *Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Entorno Gráfico*, Madrid, pp. 41-55.
- Hodgman, C. (Editor), 1961. *Handbook of chemistry and physics*. 44 edición. Chemical Rubber Publishing Co., 3604 pp.
- Howe, J.A. 1910. *The Geology of Building Stones*. Edward Arnold, London. 455 pp.
- Instituto Geológico y Minero de España, 1988. *Atlas geocientífico del medio natural de la Comunidad de Madrid*. [realizado por el Instituto con la colaboración de Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos. F.J. Ayala Carcedo, Ed. Madrid, IGME, 83 pp. 4 mapas.
- Iñigo, A.C. y Vicente-Tavera, S., 2002. Surface-inside (10 cm) thermal gradients in granitic rocks: effect of environmental conditions. *Building and Environment*, 37(1): 101-108.
- Jenkins, K.A. y Smith, B.J., 1990. Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands. *Catena*, 17(4-5): 449-459.
- Jiménez, E. 1973. El Paleógeno del borde suroeste de la Cuenca del Duero: I. Los escarpes del Tormes. *Stvdia Geologica Salmanticensia* 3, 67-110.
- Julien, A.A., 1880. The durability of building stones in New York City and vicinity. *Tenth Census of the United States*, 10, pp. 370-373.
- Kane, H.L., 1999. *Background Controls on the Weathering of Granite in Polluted Environments* (Tesis Doctoral). Queen's University of Belfast, Belfast. 400 pp.

- Kelly, W.C. y Zumberge, J.H., 1961. Weathering of a quartz diorite at Marble Point, Mcmurdo Sound, Antarctica. *Journal of Geology*, 69(4): 433-446.
- Kerr, A., Smith, B.J., Whalley, W.B. y McGreevy, J.P., 1984. Rock temperatures from southeast Morocco and their significance for experimental rock-weathering studies. *Geology*, 12: 306-309.
- Kessler, D.W., 1919. Physical and chemical tests on the commercial marbles of the united states. Technologic papers of the bureau of standards No. 123
- Koch, A. y Siegesmund, S., 2004. The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46: 350-363.
- López de Azcona, M.C., Mingarro, F. y Fort, R., 1996. Estudio Medioambiental en el Palacio Real de Madrid. *Geogaceta*, 20: 1155-1158.
- Malaga-Starzec, K., 2003. Microscopic and Macroscopic Studies of Initial Weathering of Natural Stones Used as Building Materials. Chalmers, Göteborg, 83 pp.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Zafiropulos, V. y Fotakis, C., 1999. Excimer laser cleaning of encrustation on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects. *Applied Surface Science* 148: 92-104.
- Maravelaki, P., Kalaitzaki, M., Anglos, D., Kilikoglou, V. y Zafiropulos, V., 2001. compositional characterization of encrustation on marble with Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*, 56: 887-903
- Mcalister, J.J. y Smith, B.J., 1994. A Pressure-Membrane Technique to Prepare Clay Samples for X-Ray-Diffraction Analysis. *Journal of Sedimentary Research Section a-Sedimentary Petrology and Processes*, 65(3): 569-571.
- McGreevy, J.P., 1985. Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 125-136.
- McGreevy, J.P., Warke, P.A. y Smith, B.J., 2000. Controls on stone temperatures and the benefits of interdisciplinary exchange. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(2): 259-274.
- Merrill, G.P., 1906. *A Treatise on Rocks, Rock-Weathering and Soils*. Mcmillan & Co, London.

- Migon, P. y Thomas, M.F., 2002. Grus weathering mantles-problems of interpretation. *Catena*, 49(1-2): 5-24.
- Mendiña, J., Fort, R., García del Cura, M.A., Galán, L., Pérez-Monserrat, E., Fernández-Revuelta, B., Bernabeu, A., Varas, M.J. y Bellido, F., en prensa. Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX. IGME-IGE, Madrid.
- Mingarro Martin, F., 1996. Disgregación Mecánica de Materiales. In: F. Mingarro Martin (Editor), *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Editorial Complutense, Madrid, pp. 321-332.
- Neila González, F.J., 2000. El soleamiento del edificio I. El sol y la radiación solar. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Instituto Juan de Herrera - E.T.S.A.M, Madrid, 36 pp.
- Ollier, C.D., 1963. Insolation weathering: Examples from Central Australia. *American Journal of Science*, 261: 376-381.
- Ollier, C.D., 1965. Some features of granite weathering in Australia. *Zeitschr. Geomorphologie N. F.*, 9: 285-304.
- Ollier, C.D., 1984. *Weathering. Geomorphology texts; 2*. Longman, London; New York, 270 pp.
- Ollier, C.D. y Tuddenham, W.G., 1962. Inselbergs of Central Australia. *Zeitschr. Geomorphologie N. F.*, 5: 257-276
- Ollier, C.D. y Ash, J.E., 1983. Fire and rock breakdown. *Zeitschr. Geomorphologie N. F.*, 27(3): 363-374.
- Ordaz, J. y Esbert, R.M., 1990. Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, 40:.
- Paradise, T.R., 1999. Analysis of sandstone weathering of the Roman theater in Petra, Jordan. *Annual of the Department of Antiquities of Jordan*, 43: 353-368.
- Peel, R.F., 1974. Insolation weathering: Some measurements of diurnal temperature changes in exposed rocks in the Tibesti region, central Sahara.,. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl. Bd.*, 21: 19-28.

- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R., 1972. Sand and sandstone. Springer-Verlag, Berlin, New York., xvi, 618 p. pp.
- Poblador Muga, M.P., 2001. Legislación internacional sobre patrimonio y restauración: Convenios y Cartas Internacionales. In: J. Gisbert Aguilar (Editor), I jornadas de Caracterización y Restauración de Materiales Pétreos en Arquitectura, Escultura y Restauración. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 3-58.
- Preisinger, A. 1963. Sepiolite and related compounds: its stability and application. *Clays and Clay Minerals* 6, 61-67.
- Price, C.A., 1996. Stone conservation: an overview of current research. Getty Conservation Institute, Santa Monica, CA, xiii, 73 pp.
- Rice, A., 1976. Insolation warmed over. *Geology*, 4: 61-62.
- Rice, A., 1977. Insolation warmed over: Reply. *Geology*, 5(3): 189-190.
- RILEM, 1980. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, 75: 175-253.
- Rodríguez, J. y Alcalde, M., 1998. La alteración de la piedra en la Catedral de Jerez (Cádiz, España) In: IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Tenerife, pp. 197-199.
- Rodriguez-Navarro, C. y Doehne, E., 2000. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallisation pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 191-209.
- Rodriguez-Navarro, C., Linares-Fernandez, L., Doehne, E. y Sebastián, E., 2002. effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stones. *Journal of Crystal Growth*, 243: 503-516.
- Roth, E.S., 1965. Temperature and water content as factors in desert weathering. *Journal of Geology*, 73: 454-468.
- Sancho, C., Fort, R. y Belmonte, A., 2003. Weathering rates of historic sandstone structures in semiarid environments (Ebro basin, NE Spain). *Catena*, 53(1): 53-64.
- Schaffer, R.J., 1932. The weathering of natural building stones. Building Research Establishment, Watford, x, 149 pp.

- Shadmon, A., 1993. Dimension stone, its impact on environment and constructional applications. The role of Engineering Geology. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 48: 119-122.
- Shaler, N.S., 1869. Notes on the concentric structure of granitic rocks. Proceedings Boston Society Natural History, 12: 289-291.
- Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. y Tschegg, E.K., 2000a. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. International Journal of Earth Sciences, 89: 170-182.
- Siegesmund, S., Weiss, T. y Tschegg, E.K., 2000b. Control of marble weathering by thermal expansion and rock fabrics. In: V. Fassina (Editor), Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 19-24, 2000. Elsevier, Amsterdam, pp. 205-213.
- Smith, B.J., 1977. Rock temperature measurements from the northwest Sahara and their implications for rock weathering. Catena, 4(1-2): 41-63.
- Smith, B.J., 1978. Aspect related variations in slope angle near Béni Abéss, Western Algeria. Geog. Ann. 60A, 175-180.
- Smith, B.J., 1994. Weathering processes and forms. In: A.D. Abrahams and A.J. Parsons (Editores), Geomorphology of desert environments. Chapman & Hall, London ; New York, pp. 39-63.
- Smith, B.J., 1996. Scale problems in the interpretation of urban stone decay. In: B.J. Smith y P.A. Warke (Editores), Processes of Urban Stone Decay, Proceedings of Swapnet 1995. Donhead, London, pp. 3-18.
- Smith, B.J. y McGreevy, J.P., 1988. Contour scaling of a sandstone by salt weathering under simulated hot desert conditions. Earth Surface Processes and Landforms, 13: 697-706.
- Smith, B.J. y Warke, P.A., 1997. Controls and uncertainties in the weathering environment. In: D.S.G. Thomas (Editor), Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands, 2nd edition. Wiley, pp. 41-52.
- Smith, B.J., McGreevy, J.P. y Whalley, W.B., 1987. The production of silt-size quartz by experimental salt weathering of a sandstone. J. Arid Environ. 12, 199-214.

- Smith, B.J., Warke, P.A. y Moses, C.A., 2000. Limestone weathering in contemporary arid environments: A case study from southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(12): 1343-1354.
- Smith, B.J., Warke, P.A., McGreevy, J.P. y Kanes, H.L., 2005. Salt-weathering Simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions? *Geomorphology*, 67: 211-227.
- Soler, M. y Puigdefàbregas, C. 1970. Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos* 96, 5-20.
- Sridhar, N., Yang, W.H., Srolovitz, D.J. y Fuller (Jr), E.R., 1994. Microstructural Mechanics Model of Anisotropic-Thermal-Expansion-Induced Microcracking. *Journal of the American Ceramic Society*, 77(5): 1123-1138.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1): 1-33.
- Sunagawa, I., (1981). Characteristics of crystal growth in nature as seen from the morphology of mineral crystals. *Bulletin de Minéralogie*, 104: 81-87.
- Tarr, W.A., 1915. A study of some heating tests, and the light they throw on the cause of the disaggregation of granite. *Economic Geology*, 10: 348-367.
- Turkington, A.V., 1996. Stone Durability. In: B.J. Smith y P.A. Warke (Editores) *Processes of Urban Stone Decay; Proceedings of SWAPNET*. Donhead, London, pp. 19-31
- Turkington, A.V., Smith, B.J. y Basheer, P.A.M., 2002. Sub-surface temperature and moisture changes in sandstone. In: R. Prikryl y H.A. Viles (Editores), *Understanding and Managing of Stone Decay*. Charles University in Prague, The Karolinum Press, Prague, pp. 113-126.
- VanScoyoc, G. E., Serna, C. J. y Ahlrichs J. L. 1979. Structural changes in palygorskite during dehydration and dehydroxylation. *American Mineralogist*, 64: 215-223
- Varas Muriel, M.J., Gómez-Heras, M. y Fort González, R., 2003. Abastecimiento de piedra en monumentos de Madrid del siglo XIX: La Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena y el Panteón de Hombres Ilustres. *Restauración y Rehabilitación*, 79: 46-51.



- Vergès-Belmin, V. et al., (25 autores), 2004. An internet-accessible multilingual illustrated glossary on stone deterioration. In: D. Kwiatkowski and R. Löfvendahl (Editores), 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Stockholm 2004, pp. 699-706.
- Villegas, R., Vale, J. F. y Alcalde, M., 1991. Study of water-repellent treatments applied on limestone from Andalusian cathedrals. *Materiales de Construcción*, 41, 223, 19-27.
- Warke, P.A., 2000. Micro-environmental conditions and rock weathering in hot, arid regions. *Zeitschr. Geomorphologie N. F. Suppl. Bd.*, 120: 83-95.
- Warke, P.A. y Smith, B.J., 1994. Short-term rock temperature fluctuations under simulated hot desert conditions: some preliminary data. In: D.A. Robinson y R.B.G. Williams (Editores), *Rock Weathering and Landform Evolution*. British Geomorphological Research Group symposia series. Wiley, Chichester; New York, pp. 57-70.
- Warke, P.A. y Smith, B.J., 1998. Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests. *Geomorphology*, 22(3-4): 347-357.
- Warke, P.A. y Smith, B.J., 2000. Salt distribution in clay-rich weathered sandstone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(12): 1333-1342.
- Warke, P.A., Smith, B.J. y Magee, R.W., 1996. Thermal response characteristics of stone: implications for weathering of soiled surfaces in urban environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 295-306.
- Weiss, T., Fuller (Jr), E.R. y Siegesmund, S., 2002. Thermal stresses in calcite and dolomite marbles quantified by finite element modelling. In: S. Siegesmund, T. Weiss y A. Vollbrecht (Editores), *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies, and case studies*. Geological Society special publication vol. 205. Geological Society, London, pp. 84-94.
- Weiss, T., Siegesmund, S. y Fuller (Jr), E.R., 2003. Thermal degradation of marble: indications from finite-element modelling. *Building and Environment*, 38(9-10): 1251-1260.

- Weiss, T., Saylor, D., Fuller, E.R., Jr y Siegesmund, S., 2004. Prediction of the degradation behavior of calcareous rocks via finite-element modelling. In: D. Kwiatkowski y R. Löfvendahl (Editores), 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Stockholm 2004, pp.163-170
- Weiss, T., Siegesmund, S., Kirchner, D. y Sippel, J., 2004. Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology*, 46: 402-413.
- Wickström, U., 2004. Heat transfer by radiation and convection in fire testing. *Fire and Materials*, 28: 411-415.
- Winchester, S., 2002. *The Map that Changed the World*. Penguin, London, 338 pp.
- Winkler, E.M., 1973. *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*. Springer Verlag, Berlin, 230 pp.
- Winkler, E.M., 1977. Insolation warmed over: Comment. *Geology*, 5(3): 188-189.
- Winkler, E.M., 1997. *Stone in architecture : properties, durability*. Springer-Verlag, Berlin ; New York, xvi, 313 pp.
- Yang, W.H., Srolovitz, D.J., Hassold, G.N. y Anderson, M.P., 1990. The effect of grain boundary cohesion on the fracture of brittle, polycrystalline materials. In: M.P. Anderson y A.D. Rollett (Editores), *Simulation and Theory of Evolving Microstructures*. The metallurgical Society, Warrendale, Pennsylvania, pp. 277-284.
- Yatsu, E., 1988. *The nature of weathering: an introduction*. Sozosha : Overseas distributor Maruzen Co., Tokyo, xiii, 624 pp.
- Yuen, W.W. y Chow, W.K., 2004. The role of thermal radiation on the initiation of flashover in a compartment fire. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(19-20): 4265-4276.
- Yuen, W.W. y Tien, C.L., 1976. A simplified calculation scheme for the luminous flame emissivity, In: *Proceeding of the 16th Symposium (International) of Combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1481-1487
- Zeisig A., Weiss T. y Siegesmund S., 2002. Thermal expansion and its control on the durability of marbles. In: Siegesmund S, Weiss T, Vollbrecht A, editores. *Natural*

---

stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies, Geological Society special publication vol. 205. London: Geological Society, 2002. p. 57–72.

Zimmermann, A., Carter, W.C. y Fuller (Jr), E.R., 2001. Damage evolution during microcracking of brittle solids. *Acta Materialia*, 49: 127-137.